

Trabalho de Conclusão de Curso

AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DA CARGA DE LAVAGEM NA ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DE UMA VALA DE INFILTRAÇÃO LOCALIZADA NO DISTRITO DO CAMPECHE (FLORIANÓPOLIS/SC)

Eduardo Gava Orlando

Orientadora

Prof^a Dra. Alexandra Rodrigues Finotti

Co-orientadora

MSc. Elisa Ferreira Pacheco

2017-1



Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental

Eduardo Gava Orlando

**AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DA CARGA DE
LAVAGEM NA ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DE UMA
VALA DE INFILTRAÇÃO LOCALIZADA NO DISTRITO
DO CAMPECHE (FLORIANÓPOLIS/SC)**

Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina para a Conclusão do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Prof^ª Dra. Alexandra Rodrigues Finotti

Co-orientadora: MSc. Elisa Ferreira Pacheco

Florianópolis, 2017.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Orlando, Eduardo

Avaliação do fenômeno da carga de lavagem na área de contribuição de uma vala de infiltração localizada no distrito do campeche (Florianópolis/SC) / Eduardo Orlando ; orientador, Alexandra Rodrigues Finotti, coorientador, Elisa Ferreira Pacheco, 2017/1.

124 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2017/1.

Inclui referências.

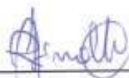
1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Carga de lavagem. 3. Turbidez. 4. Escoamento superficial. 5. Técnicas compensatórias. I. Rodrigues Finotti, Alexandra. II. Ferreira Pacheco, Elisa. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Eduardo Gava Oriando

**AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DA CARGA DE LAVAGEM NA ÁREA DE
CONTRIBUIÇÃO DE UMA VALA DE INFILTRAÇÃO LOCALIZADA NO
DISTRITO DO CAMPECHE (FLORIANÓPOLIS/SC)**

Trabalho submetido a Banca Examinadora como
parte dos requisitos para Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental
TCC II

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Alexandra Rodrigues Finotti
(Orientador)



Prof. Dra. Patrícia Kazue Uda



Mestrando Gustavo Andrei Speckhann

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família. À minha mãe Vera, que em toda minha trajetória desde o ensino fundamental até o final da minha graduação, nunca mediu esforços para me proporcionar as melhores condições possíveis, fazendo tudo para me ver feliz. Também à minha irmã Giovana, que sempre esteve presente dando apoio e torcendo por mim nessa trajetória.

Aos meus padrinhos Tito Lívio e Jurema Terezinha, que estiveram sempre de portas abertas me dando todo o suporte necessário para que Florianópolis se tornasse também a minha casa.

À minha namorada Mariana, por todos os momentos compartilhados, carinho e apoio nos últimos tempos, principalmente ao longo deste trabalho de conclusão de curso.

A todos os meus amigos de Criciúma, por toda a amizade e por proporcionarem grandes momentos ao longo dos anos

Aos grandes amigos que fiz ao longo da graduação, tanto aqueles da primeira semana de recepção, os quais levo até hoje comigo, quanto aos que me aproximei no final da graduação. Muito obrigado, tenho certeza que são os responsáveis por os meus sete anos de graduação deixarem muita saudade.

Ao meu primo Fabricio Gava, pela amizade, disponibilidade e auxílio na etapa final desse trabalho.

À minha amiga Pricila Kern pela paciência e ensinamentos estatísticos.

À minha orientadora, Alexandra Finotti, pela oportunidade de realizar esse trabalho junto ao seu grupo de pesquisa.

À minha co-orientadora Elisa Ferreira, pela paciência, auxílio e por sempre acreditar nesse trabalho.

À banca examinadora, Gustavo Speckhann e Patrícia Kazue, pela atenção e sugestões na correção deste trabalho.

RESUMO

Diante da urbanização sem o devido planejamento, muitas cidades vem sofrendo as consequências negativas relacionadas aos altos índices de impermeabilização do solo e aumento da poluição difusa. Fatores esses que acarretam especialmente na ocorrência de enchentes com maior frequência, magnitude e mais nocivas aos ecossistemas receptores do escoamento superficial proveniente da drenagem urbana. Em frente a essa problemática, surgiram as técnicas compensatórias de drenagem urbana, que buscam compensar os efeitos da urbanização das bacias hidrográficas atuando ao mesmo tempo no controle dos volumes e da qualidade do escoamento. Diversas pesquisas na área apontam uma possível tendência da parcela inicial do escoamento superficial carregar a maior porção da carga poluente, fenômeno esse chamado de carga de lavagem. No presente trabalho, foi avaliada a ocorrência do fenômeno da carga de lavagem para o parâmetro turbidez no escoamento superficial da montante de uma vala de infiltração localizada no Distrito do Campeche, situado no Município de Florianópolis. Foram avaliados 28 eventos através das curvas massa/volume, assim como buscou-se encontrar relações entre a intensidade da carga de lavagem e as características de cada evento de chuva. Através a aplicação da metodologia selecionada, os resultados apontaram que apenas 3,5% dos eventos apresentaram o fenômeno da carga de lavagem com alta intensidade. A partir das análises da correlação da intensidade da carga de lavagem com as características dos eventos de chuva, foi possível concluir que na área estudada, os eventos de chuva mais longos e de maiores magnitudes possuem tendência a apresentar a carga de lavagem. Uma possível explicação é que tais eventos possuem maior energia para remover a maior parte da carga de turbidez, provendo menores níveis de carga de turbidez na parte final do evento

PALAVRAS CHAVE: Carga de lavagem, Turbidez, Escoamento Superficial, Técnicas Compensatórias, Drenagem Urbana

ABSTRACT

Since the urbanization without planning, many cities have been facing negative consequences related high levels of soil impermeabilization and increasing the diffusion pollution. These activities lead to higher flood frequency, magnitude and more harmful to receiving natural water bodies. Through this problems, a different way to deal with drainage problems was essential. The compensatory drainage techniques aims to reduce the effects of watershed urbanization, focusing at the same time in the volume control and in the improvements of the water quality. Many research in this area suggest a possible tendency that the first part of the stormwater contains the main portion of pollutants loads, this phenomenon is called the first flush of stormwater. This paper evaluated the occurrence of first flush phenomenon for turbidity parameter in the stormwater in the contribution area of a trench infiltration, located in the district of Campeche, Florianópolis – SC, Brazil. The final validated database contains 28 rainfall events, which were evaluated producing their M(V) curves, as well as statistical test to find correlations between the first flush intensity and the rainfall events characteristics. Through the selected methodology, results showed that only 3,5% of rainfall events presented strong first flush. Using the statistical and graphical analysis of correlations between rainfall events characteristics and the first flush intensity, it was found that the first flush is more likely to appear during long storm events with large runoff volume. A possible explanation is that such events with this characteristics have greater energy to remove most of turbidity loads, providing lower levels of turbidity loads at the end of stormwater.

KEYWORDS: First Flush, Turbidity, Stormwater, Compensatory Techniques, Urban Drainage

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Alterações no balanço hídrico devido ao uso do solo	26
Figura 2 – Aumento da integração e sofisticação da gestão da drenagem urbana ao longo do tempo.....	28
Figura 3 - Modelo de vala de infiltração.....	30
Figura 4 - Exemplo de curva $M(V)$	38
Figura 5 - Método de Geiger	40
Figura 6 - Método de Gupta e Saul	41
Figura 7 - Zonas na curva $M(V)$ dependendo do parâmetro b	43
Figura 8 - Curva Adimensional $M(V)$ para a) área urbana b) área residencial c) área industrial	45
Figura 9 - Curva Acumulativa $M(V)$ para os parâmetros Sólido Suspensos Totais, DQO, Nitrogênio Total e Fósforo Total.....	47
Figura 10 - Curva acumulativa $M(V)$ para SS, DBO e NTK para o evento 06/04(esquerda) e 27/02 (direita)	48
Figura 11 - Curva $M(V)$ de sólidos suspensos da bacia C.O.....	49
Figura 12 - Curva $M(V)$ para Sólidos Suspensos na sub bacia Iate.....	50
Figura 13 - Quadro síntese do processo metodológico	51
Figura 14 - Localização Distrito do Campeche	52
Figura 15 - Área de contribuição da vala de infiltração	54
Figura 16 - Vala de Infiltração - Avenida Pequeno Príncipe	55
Figura 17 Croqui com a instrumentalização da vala de infiltração.....	57

Figura 18 - Elaboração da curva $M(V)$	65
Figura 19 Duração e precipitação total dos eventos	71
Figura 20 - Duração e Concentração média do evento.....	72
Figura 21 - Síntese curvas $M(V)$ dos 28 eventos.....	73
Figura 22 – Hietograma, hidrograma, polutograma e curva $M(V)$ do Evento 11	74
Figura 23 – Hietograma, hidrogramas, polutograma e curva $M(V)$ do Evento 8.....	78
Figura 24 – Hietograma, hidrogramas, polutograma e curva $M(V)$ do Evento 3.....	81
Figura 25 - Hietograma, hidrogramas, polutograma e curva $M(V)$ do Evento 26	82
Figura 26 - Comparação intensidade média com valor b	83
Figura 27 - Comparação intensidade máxima em 5 min com o valor de b	84
Figura 28 - Comparação da precipitação total com o valor de b	85
Figura 29 - Comparação dos dias de seca antecedentes com o valor de b ..	86
Figura 30 - Comparação do tempo de precipitação com o valor de b	87
Figura 31 - Comparação do volume acumulado com o valor de b	88
Figura 32 - Comparação da CME com o valor de b	89
Figura 33 - Comparação da Vazão máxima com o valor de b	90
Figura 34 - Hietograma, hidrogramas, polutograma e curva $M(V)$ do Evento 14	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de valas de infiltração	31
Tabela 2 - Valores de X e Y e b correspondentes as 6 zonas na curva M(V)	42
Tabela 3 - Tipologia da curva M(V) e intensidade da carga de lavagem conforme o parâmetro b	42
Tabela 4 - Características da vala de infiltração	55
Tabela 5 - Instrumentação da vala de infiltração	56
Tabela 6 - Eventos selecionados	60
Tabela 7 - Parâmetros quantitativos dos eventos de chuva.....	61
Tabela 8 - Síntese das características dos eventos analisados	68
Tabela 9 - Distribuição dos eventos nas 6 zonas de intensidade conforme o valor b	75
Tabela 10 - Porcentagem da carga de Turbidez transportada em 30 % do volume	76
Tabela 11 - Correlação de Pearson e Spearmann entre a carga de lavagem (em 30% do volume) e os parâmetros quantitativos do evento	79

Sumário

1	INTRODUÇÃO	22
2	OBJETIVOS.....	24
2.1	Objetivos Geral.....	24
2.2	Objetivos Específico	24
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
3.1	Urbanização das Bacias Hidrográficas e Enchentes Urbanas	25
3.2	Drenagem Tradicional x Drenagem Sustentável.....	26
3.3	Vala de Infiltração	29
3.4	Poluição Pluvial e Poluição Difusa	31
3.4.1	Sedimentos	32
3.4.2	Sólidos Suspensos Totais e Turbidez	33
3.5	Carga de Lavagem.....	35
3.5.1	Curva M(V)	36
3.5.2	Métodos para cálculo da carga de lavagem.....	39
3.5.2.1	Geiger (1984).....	39
3.5.2.2	Gupta e Saul (1996)	40
3.5.2.3	BertrandKrajewski et al. 1995	41
3.5.3	Estudos de Casos do fenômeno da carga de lavagem baseado na Curva M(V)	43
3.5.3.1	Estudo de Caso em Czeszochowa – Polônia -	43
3.5.3.2	Estudo de Caso em Wuhan – China.....	46
3.5.3.3	Estudo de Caso Santander – Espanha	48
3.5.3.4	Estudo de Caso Brasília - Brasil.....	49
4	MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1	Caracterização da área de estudo.....	52
4.2	Instrumentalização e Monitoramento do Escoamento Superficial	55
4.3	Definição dos eventos de chuva	58

4.4	Tratamento dos dados para carga de lavagem	58
4.4.1	Representatividade dos dados.....	58
4.4.2	Concentração Média do Evento.....	59
4.4.3	Eventos analisados	60
4.4.4	Parâmetros quantitativos considerados na análise da carga de lavagem	61
4.5	Avaliação do fenômeno da carga de lavagem.....	62
4.5.1	Curva M(V).....	63
4.5.2	Crítérios para ocorrência da carga de lavagem.....	66
4.5.3	Análise estatística	67
5	RESULTADOS	67
5.1	Avaliação do fenômeno da carga de lavagem.....	71
5.1.1	Caracterização da precipitação	71
5.1.2	Caracterização da Concentração média do evento	71
5.1.3	Síntese Curvas M (V).....	72
5.1.4	Análise da intensidade da carga de lavagem	75
5.2	Correlação do fenômeno da carga de lavagem com os dados quantitativos dos eventos.....	77
5.2.1	Análise estatística da correlação da carga de lavagem com os dados quantitativos dos eventos	79
5.2.2	Intensidade média e máxima em 5 minutos.....	80
5.2.3	Precipitação total	84
5.2.4	Dias de seca antecedente.....	85
5.2.5	Tempo de precipitação	86
5.2.6	Volume Acumulado	87
5.2.7	Concentração média do evento (CME).....	88
5.2.8	Vazão Máxima.....	89
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
7	REFERÊNCIAS	95

8	ANEXOS	101
8.1	Forte carga de lavagem	101
8.2	Moderada carga de lavagem	102
8.3	Fraca carga de lavagem.....	109
8.4	Sem carga de lavagem.....	113
8.5	Moderado retardo na descarga da turbidez	119

1 INTRODUÇÃO

O intenso e desordenado fenômeno de urbanização tem causado consequências cada vez mais evidentes nos ecossistemas urbanos em diversas cidades. O desmatamento e o uso e ocupação do solo sem planejamento são fatores modificadores que acarretam em alterações na cobertura e configuração natural do solo, especialmente por implicar diretamente na sua impermeabilização da superfície. Como consequências, podem ser citadas o aumento do escoamento superficial, a redução dos processos de infiltração, a interceptação e evaporação, além do aumento da velocidade do escoamento superficial. (CRUZ et al., 2001).

Além disso, diversas atividades antrópicas também são agravantes da poluição difusa, a qual está distribuída ao longo da superfície da bacia hidrográfica, tornando os eventos intensos de chuva cada vez mais nocivos (BAPTISTA, BARRAUD e NASCIMENTO, 2005). De fato, uma vez que a rede de drenagem urbana tem potencial de transportar grandes cargas poluidoras, o escoamento superficial carrega a poluição difusa presente na superfície da bacia hidrográfica para as regiões a jusante. (ZUBIAURRE BRITES, 2005).

O somatório das mudanças decorrentes da urbanização descontrolada intensificam a ocorrência e a magnitude das enchentes urbanas, acarretando em grandes riscos a população. Mais além, as inundações e alagamento das cidades estão cada vez mais recorrentes, provocando, dentre outras consequências no âmbito social e econômico, desalojamento de famílias e danificações em empreendimento na infraestrutura urbana. Há mais de uma década Tucci (1995) apontou que estão cada vez mais notáveis as consequências negativas na qualidade de água dos córregos urbanos devido à lavagem das ruas, arraste de material sólido e ligações clandestinas de esgoto cloacal, que acabam por desaguar nos mananciais. Portanto, é essencial o gerenciamento responsável das águas pluviais, a fim de mitigar os efeitos da urbanização das bacias hidrográficas.

Com o intuito de compensar as alterações antrópicas decorrentes da urbanização nas bacias hidrográficas, surgiram as técnicas compensatórias em drenagem urbana. Apesar de ainda timidamente implementadas do Brasil, a aplicação de soluções alternativas para problemas relacionados ao escoamento de águas pluviais vem sendo gradativamente incorporadas aos sistemas de drenagem existente. De fato, estas medidas são certamente importantes, pois objetivam o retardamento e a retenção do escoamento superficial,

reduzindo a vazão a jusante assim como uma melhoria da qualidade das águas superficiais.

Shamseldin (2011) acredita que as medidas de gestão das águas urbanas através de controle do volume de escoamento e a remoção de poluentes, podem ser reconhecidas com a chave para uma efetiva redução dos impactos negativos do escoamento superficial nos ecossistemas receptores.

No entanto, para que medidas estruturais possam ser aplicadas de forma coerente, é necessário compreender a fundo todas as variáveis ambientais da região e características da bacia hidrográfica, tornando assim, a escolha e concepção de tais projetos tarefa bastante complexa.

A estimativa da carga de poluentes aliada ao entendimento do mecanismo de escoamento superficial se constituem em importantes requerimentos para que os responsáveis pela gestão da qualidade das águas pluviais compreendam a situação local e proponham soluções eficientes (FLETCHER e DELETIC, 2007). Neste contexto, cada vez mais estudos vem sendo desenvolvidos no âmbito da sustentabilidade da drenagem urbana, de forma a encontrar índices, indicadores e variantes que auxiliem a tomada de decisão.

A distribuição da carga poluidora no escoamento superficial vem sendo amplamente relatada em diversos trabalhos, o que proporciona avanços relacionados ao entendimento mais detalhado acerca da natureza e comportamento dos poluentes, além das consequências dos mesmos no escoamento superficial. Muitos estudos sugerem que a maior parcela da carga poluidora é transportada na parte inicial do escoamento superficial, característica essa chamada de carga de lavagem (LI et al., 2007; MROWIEC et al., 2009; COSTA, 2013; TEMPRANO et al., 2005). Apesar de diversas regiões apresentarem esse fenômeno, ainda há incerteza sobre a ocorrência, e principalmente sobre os fatores de influência. No âmbito das técnicas compensatórias, o estudo da carga de lavagem é de suma importância, pois caso seja comprovado, é possível a sua utilização como parâmetro para um dimensionamento mais eficiente e econômico (BERTRAND-KRAJEWSK et al., 1995; LUO, 2012; WEIDMANN, 2005; entre outros). Assim sendo, o entendimento das relações entre concentração de poluentes, magnitude dos eventos de chuva e padrões de clima local é vital para engenheiros e gestores urbanos projetarem melhores soluções para interceptar volumes específicos do escoamento superficial com a maior carga de poluentes (BATRONEY et al., 2009).

Este estudo objetiva avaliar a ocorrência do fenômeno da carga de lavagem para o parâmetro turbidez no escoamento superficial na área de contribuição de uma vala de infiltração, localizada no Distrito do Campeche, na

cidade de Florianópolis, assim como, caso exista, os fatores que podem ter influência no fenômeno. O intuito é melhorar a compreensão dos processos no escoamento superficial, transporte de poluentes e de maneira a incentivar e dar suporte a implementação de técnicas compensatórias de drenagem urbana

Este trabalho foi feito em parceria com o Laboratório de Águas Urbanas e Técnicas Compensatórias, este que ao longo dos últimos anos vem desenvolvendo diversos estudos no âmbito das técnicas compensatórias. No caso da vala de infiltração, estrutura a qual será estudada a carga de lavagem na sua entrada, esta é monitorada e estudada a aproximadamente quatro anos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Geral

Analisar a ocorrência do fenômeno da carga de lavagem na área de contribuição de uma Vala de Infiltração, localizada no Distrito do Campeche (Florianópolis/SC).

2.2 Objetivos Específico

- i.** Avaliar a correlação da intensidade da carga de lavagem com os parâmetros quantitativos de precipitação e escoamento superficial.

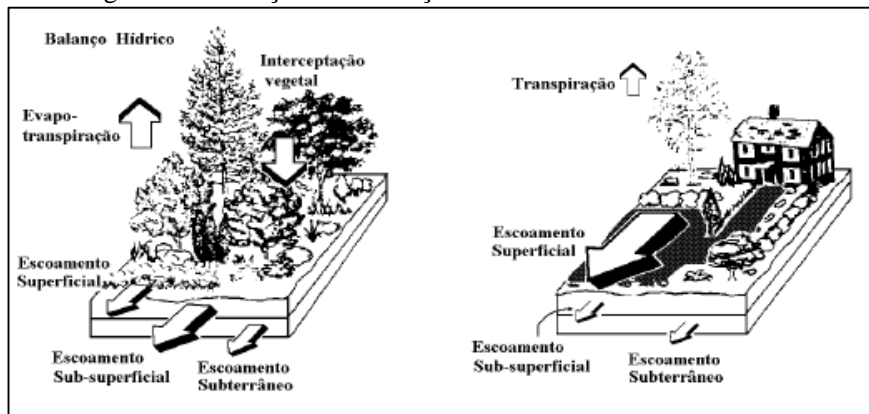
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Urbanização das Bacias Hidrográficas e Enchentes Urbanas

O desenfreado desenvolvimento urbano que ocorreu nos últimos cinquenta anos causou grande impacto aos ecossistemas naturais. Grandes concentrações populacionais ocuparam-se de áreas sem qualquer controle, levando a impactos terrestres, aquáticos e à própria população com inundações e transmissão de doenças (TUCCI, 2005).

Segundo Cruz (2001), os ambientes urbanos foram atraindo cada vez mais pessoas, e a ausência de um gerenciamento e controle adequado gerou um inchaço populacional. Com isso, áreas impróprias foram ocupadas, como margem de córregos e encostas de morros. Esse crescimento provocou a mudança na cobertura vegetal e configuração natural do solo, acarretando assim em alterações no ciclo hidrológico natural. Pompêo (2000) classifica o desmatamento e a substituição da cobertura natural como fatores modificadores da bacia hidrográfica. Tais atividades levam a um aumento das áreas impermeáveis, reduzindo assim, a possibilidade para as águas pluviais infiltrarem. Além da impermeabilização reduzir drasticamente o volume da água infiltrada, Cruz (2000) indica que ocorre a redução da interceptação e evapotranspiração, direcionando assim uma maior parcela de água pluvial para o escoamento superficial. Além disso, tanto o amortecimento do escoamento quanto o tempo de concentração são reduzidos. A Figura 1 ilustra as alterações no balanço hídrico de uma bacia devido ao uso e ocupação do solo.

Figura 1 - Alterações no balanço hídrico devido ao uso do solo



Fonte: Tucci (2005).

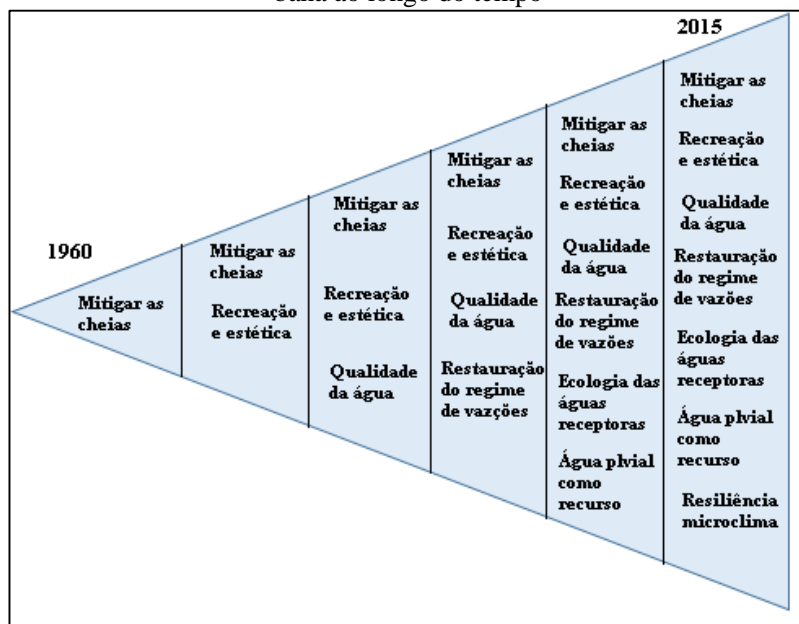
Canholi (2014) explica que esses fatores citados levam ao aumento da vazão de pico devido à redução dos espaços naturais, e posteriormente acarretam em inundações nas áreas à jusante da bacia. Todavia, Pompeo (2000), esclarece que enchentes podem ser eventos naturais, como nos casos de chuvas com alta intensidade e alto período de retorno. Por outro lado, existem as inundações que acontecem devido às mudanças no sistema hidrológico de regiões a montante de zonas urbanas (canalização de córregos, obstrução do escoamento e impermeabilização do solo). Certamente, todos os dois tipos de enchentes apresentam um grande risco para população, podendo ser causadores de danos sociais e econômicos. Tucci (1995) aponta que ocorre um aumento na produção de sedimentos e de resíduos sólidos, uma vez que as superfícies estão desprotegidas. Portanto, é evidente a necessidade de aprimorar a gestão das águas pluviais no meio urbano com a adoção de medidas sustentáveis no âmbito da drenagem urbana.

3.2 Drenagem Tradicional x Drenagem Sustentável

A drenagem urbana tradicional ou “clássica” provem de um modelo que busca a rápida evacuação das águas urbanas, oriundos dos princípios higienistas nascidos na Europa, no século XIX, em que o escoamento pluvial era tratado como um problema de saúde pública (BAPTISTA, BARRAUD e NASCIMENTO, 2005). Os sistemas clássicos constituem-se de estruturas de micro e macrodrenagem, tais como sarjetas, que recebem as águas pluviais

nas laterais das ruas, e bocas de lobo, que captam a água escoada pelas sarjetas, além dos canais abertos e galerias pluviais subterrâneas (BAPTISTA, BARRAUD e NASCIMENTO, 2005). Entretanto, esses princípios e métodos são funcionais apenas para um trecho da bacia, pois não preveem as implicações nas regiões a jusante, como o aumento da vazão e transferência do volume pluvial. Por conseguinte, transferem uma possível inundação para outro sistema (TUCCI, 2005). Esta filosofia de drenagem urbana resulta em danos altos para a sociedade provenientes das inundações e ao meio ambiente devido às cargas de lixo e a poluição difusa transportada para os corpos hídricos (CRUZ, 1998). A Figura 2 ilustra a evolução dos conceitos da drenagem urbana ao longo das últimas décadas. É notável que se busca aumentar a eficiência da drenagem urbana, a qual na década de 60 buscavam basicamente mitigar as cheias, mas que passaram a focar em outros aspectos, incluindo recreação e estética, melhoria da qualidade de água, restauração de regimes e vazões, além do uso de água pluvial como recurso (FLRCHER et al., 2015). Ou seja, houve notavelmente uma mudança conceitual sobre a drenagem urbana que se tornou essencial para a sociedade atual. Segundo Tucci (2005), a solução não deve vir de um conceito preconcebido, mas sim de medidas combinadas onde o foco não seja de transferir o impacto para a bacia. Tucker (2007) expõe que as já conhecidas consequências negativas da urbanização aumentam a pressão para uma melhor gestão das águas pluviais com estratégias e técnicas eficientes, economicamente viáveis e ecologicamente sustentáveis

Figura 2 – Aumento da integração e sofisticação da gestão da drenagem urbana ao longo do tempo



Fonte: adaptado de Fletcher et al. (2015).

Buscando a sustentabilidade no âmbito da drenagem urbana, surgiram as técnicas compensatórias, que de modo simplificado, são medidas que visam aproximar as características de áreas urbanizadas as características ambientais naturais da bacia hidrográfica. Baptista, Barraud e Nascimento (2005) expõe que essas medidas lidam com os impactos da urbanização de forma global, onde são realizadas sistematicamente soluções que compensem os efeitos antrópicos, no ciclo hidrológico, tendo como unidade de planejamento a bacia hidrográfica. Ou seja, as técnicas compensatórias objetivam promover e facilitar a infiltração das águas pluviais e aumentar o tempo de concentração com o armazenamento temporário das águas.

A implementação de projetos mais sustentáveis de drenagem urbana se torna essencial para o desenvolvimento prospectivo e sustentável das cidades contemporâneas. Martins (2012) acredita que as medidas compensatórias devem estar presentes em uma nova maneira de se planejar e administrar as cidades, uma vez que é praticamente impossível a intervenção urbana sem impactos sobre o meio hídrico.

Todavia, Cruz (2001) ressalta que para essas soluções sejam sistemas duráveis e sustentáveis, é necessário que os projetos sejam implementados a partir de equipes multidisciplinares, incluindo, engenheiros, planejadores, urbanistas, além de membros da comunidade. Por conseguinte, concilia-se a solução dos problemas de inundações paralelamente a novos espaços integrados e multifuncionais que valorizem a água no meio urbano e melhorem a qualidade de vida do local.

Além das soluções estruturais, faz-se necessário soluções não estruturais, incluindo políticas de incentivo, capacitação técnica, educação ambiental, controles para o cumprimento das leis e uso de instrumentos de regulação, incluindo licenças ambientais e programas para minimizar as descargas ilegais de águas pluviais. Já para as soluções estruturais, existem diversas técnicas possíveis de serem aplicadas, tais como: poços de infiltração, micro reservatórios de água pluvial, pavimentos permeáveis, bacias de retenção e as valas de infiltração. Esta última será mais profundamente discutida a seguir.

3.3 Vala de Infiltração

As valas de infiltração são técnicas compensatórias das mais antigas, normalmente utilizadas na lateral de ruas e rodovias com o intuito de transportar a vazão afluente, fazer-se o armazenamento temporário e promover a infiltração (PINTO, 2011). As valas possuem funcionalidade pouco complexa, a água chega por meio direto via escoamento superficial ou via tubulação até a estrutura. Como se pode ver na Figura 3, a estrutura fica exposta ao ar livre onde a água é armazenada temporariamente. Assim, ocorre o processo de infiltração no solo, que é a principal função desta medida compensatória (BAPTISTA, BARRAUD e NASCIMENTO, 2005).

Figura 3 - Modelo de vala de infiltração



Fonte: adaptado do Comitê de Águas Pluviais de Victória (1999)

Além de ser uma estrutura simples, as valas podem ser instaladas em diversas localidades, tais como: ao longo do sistema viário, jardins, estacionamentos, áreas verdes em geral e normalmente possuem revestimento vegetal. Butler e Davis (2000) explicam que as valas, por executarem processos de infiltração, evapotranspiração e armazenamento temporário, reduzem o volume de escoamento, e, deste modo, em termos hidrológicos, promovem ganhos no amortecimento das vazões afluente e consequente rearranjo temporal do hidrograma unitário.

Para alguns autores como Butler e Davis (2000) e Ellis (1992) *apud* Baptista, Barraud e Nascimento (2005) as valas podem exercer função de pré-tratamento de poluentes (sólidos em suspensão, metais e derivados do petróleo) presentes no escoamento superficial. Esse processo ocorre através da sedimentação, filtração e adsorção no revestimento vegetal, e infiltração no solo. Entretanto os valores de eficiência relatados na bibliografia atual são bastante variáveis, uma vez que dependem de fatores específicos em situações distintas. É importante ressaltar que como esta técnica faz o uso do processo de infiltração, existe o risco de poluição do lençol freático. Para contornar este agravante, Baptista, Barraud e Nascimento (2005) recomenda que essa técnica mantenha uma distância vertical em zona não saturada de no mínimo um metro de profundidade em relação ao lençol freático. Diante do exposto, a Tabela 1 sintetiza as vantagens e desvantagens das valas de infiltração.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de valas de infiltração

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo de construção e manutenção. - Benefício financeiro com a redução das dimensões do sistema de drenagem a jusante. - Ganhos paisagísticos e consequente valorização do espaço urbano. - Benefícios ambientais com a possibilidade de recarga do lençol freático. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de manutenção periódica. - Restrição de eficiência em áreas de forte declividade. - Possibilidade de estagnação das águas, causando severas implicações sanitárias.

Fonte: Baptista, Barraud e Nascimento (2005)

3.4 Poluição Pluvial e Poluição Difusa

Apesar de toda a evolução nos conceitos de drenagem urbana, atualmente a poluição pluvial é um fator presente nas cidades contemporâneas. Devido à urbanização e à impermeabilização do solo, diversas consequências adversas são acarretadas ao meio ambiente urbano e aos corpos d'água receptores como erosão, sedimentação, enriquecimento de nutrientes (MARSALEK e CHOCAT, 2002 *apud* TUCKER, 2007).

Urbanas e Stahre (1993) apontam que a poluição pluvial tem início através dos poluentes atmosféricos que chegam ao solo pela chuva, e então continuam e, inclusive, intensificam-se com o escoamento superficial, o qual é responsável pelo transporte de poluentes dispostos sobre a superfície da área urbana até o lançamento final no corpo receptor. Estima-se que 15-25% da poluição pluvial das cidades é proveniente da precipitação. Por outro lado, existe uma parcela que provém do escoamento das águas pluviais sobre as superfícies urbanas, sendo está classificada como poluição difusa (BAPTISTA, BARRAUD e NASCIMENTO, 2005).

A poluição difusa é conceitualmente caracterizada quando poluentes adentram o corpo d'água de forma distribuída ao longo de parte de sua extensão. É um caso muito típico da poluição veiculada pela drenagem pluvial, a qual é descarregada no corpo receptor de forma distribuída, e não concentrada em um único ponto (SPERLING, 1996). Além disso, outra característica é que as cargas poluidoras dificilmente podem ser monitoradas a partir de seu ponto de origem, uma vez que a identificação da fonte poluidora nem

sempre é uma tarefa simples. Normalmente os poluentes são carregados por áreas extensas, e por tal característica, a poluição gerada pelo escoamento superficial em zonas urbanas é dita de origem difusa, onde diversas atividades contribuem para o depósito de poluentes de maneira esparsa sobre a área de contribuição da bacia hidrográfica (CARDOZO, 2003).

Sansalone e Cristina (2004) apontam outras atividades que podem gerar graves danos às águas urbanas. Por exemplo, tem-se o aumento do número rodovias, que além de aumentar a área impermeável, acumulam grande quantidade de poluentes tóxicos proveniente do motor dos veículos. Ademais, a interação entre o pavimento e o pneu e a abrasão dos componentes metálicos dos automóveis geram muito material particulado como sólidos suspensos e sedimentos que podem transportar diversos componentes nocivos ao ecossistema, exemplo dos metais pesados. Deng et al. (2005) indicam outras fontes e poluentes urbanos como sedimentos da construção civil, óleos e graxas dos motores de veículos e áreas industriais, além de bactérias provenientes das excretas de animais, despejos ilegais de esgoto, nutrientes oriundos de deposição atmosférica, fertilizantes entre outros.

Li et al. (2007) acreditam que a poluição acarretada pelo escoamento superficial é muito mais complexa de se controlar em relação às poluições pontuais devido aos seguintes fatores: natureza intermitente dos eventos chuvosos e do escoamento e a grande variedade de fontes poluidores e tipos de poluentes.

Mourad et al. (2005) ressaltam a grande gama de poluentes transportada via escoamento superficial para os corpos receptores, onde, atualmente com o aumento da preocupação da qualidade das águas urbanas vem levado a legislações mais restritivas, tornando o tema cada vez mais recorrente quando visa-se a melhoria e soluções para os problemas ambientais urbanos.

É comum encontrar diversos tipos de poluentes associados aos sedimentos urbanos, os quais podem, se consideramos o mecanismo de transporte primário para a carga poluidora, chegar aos corpos d'água receptores (PACKMAN et al., 1999).

3.4.1 Sedimentos

O desenvolvimento urbano acarreta em um grande aumento na produção de sedimentos nas bacias hidrográficas, especialmente pelas diversas atividades antrópicas que modificam a cobertura natural do solo, como: novas construções, limpeza de terrenos, ampliação de rodovias (TUCCI, 1999)

Os sedimentos podem ser caracterizados como um resíduo urbano originado pela erosão do solo causada pela desagregação das partículas devido

a intensidade de precipitação de eventos de chuva, onde posteriormente são carregados pelo escoamento pluvial até os corpos receptores. (MERTEM e POLETO, 2006, apud COSTA, 2013).

Os sedimentos apresentam alto grau de periculosidade nas águas urbanas, pois tem influência no assoreamento de seções canalizadas de drenagem, redução da capacidade de escoamento de condutos e córregos urbanos e principalmente pois podem transportar poluentes agregados como metais, amônia e outros tóxicos, que possuem alta capacidade de degradação das águas pluviais (TUCCI, 1999). Em sua pesquisa, Poleto (2007) encontrou diversos metais pesados (incluindo cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) e zinco (Zn)) e o metalóide arsênio (As) em concentrações totais elevadas em bacias urbanizadas, reforçando o fato da contribuição antrópica no processo de enriquecimento de componentes tóxicas nos sedimentos urbanos.

3.4.2 Sólidos Suspensos Totais e Turbidez

Yahyapour (2014) aponta que o principal problema relacionado ao transporte de sedimentos consequente do escoamento superficial está relacionado com as partículas de sedimento finos em suspensão. Segundo Tucci (1999), a quantidade de material suspenso na drenagem pluvial é superior a encontrada no esgoto *in natura*, sendo mais significativo no início das enchentes.

Os sólidos suspensos totais (SST) são parte significativa do aspecto físico e estético da degradação das águas pluviais, além de se mostrarem indicador de outros poluentes, principalmente nutrientes e metais que são carregados nas superfícies dos sedimentos em suspensão (PACKMAN et al., 2009). Aproximadamente 90% do fluxo dos sedimentos em suspensão são carregados no período de cheia, o que corresponde a 10% do tempo em bacias hidrográficas grandes com uso e ocupação diversificado (MERTEN e POLETO, 2006; SILVA et al., 2010 apud COSTA, 2013). No entanto, em relação à questão ambiental, os períodos de estiagem são normalmente os mais críticos para o sistema em função do volume de água disponível para diluir os poluentes, e consequentemente, reduzir sua concentração (COSTA, 2013).

Segundo Coiado (2001) apud Carvalho (2004), a determinação da vazão dos sólidos suspensos pode ser estimada de forma indireta, por intermédio da avaliação da turbidez do escoamento. A turbidez pode impedir a passagem de luz, sendo consequência de diversas partículas, principalmente as suspensas, sendo então sua análise um dos mais importantes testes para obter melhorias da qualidade das águas (YAHYAPOUR, 2014).

Costa (2013) acredita que uma boa estratégia de avaliação da quantidade de sólidos suspensos é a correlação entre a turbidez e a concentração de sedimentos. Essa correlação pode ser importante no monitoramento e gestão de bacias hidrográficas, uma vez que a medição automática da turbidez pode possibilitar uma estimativa do transporte de sedimento de fácil aquisição. Após um estudo e monitoramento da correlação destes parâmetros, na Bacia do Lago Paranoá, em Brasília, Costa (2013) encontrou correlação entre eles, tendo como fator relevante o número de dias sem chuva antecedentes ao evento chuvoso. Foi possível associar um maior período de acumulação de sedimentos a uma maior turbidez da água pluvial. Logo, constatou também que o uso de um turbidímetro pode vir a fornecer bons conhecimentos dos sólidos suspensos que estão sendo lançados nos corpos receptores.

Packman et al. (2009) também investigaram essa relação e concluíram que a turbidez pode produzir satisfatoriamente um parâmetro para estimar os sólidos suspensos totais em córregos urbanizados, sugerindo também a turbidez como uma boa medida de controle de qualidade de água, uma vez que o monitoramento dos sólidos suspensos totais é logisticamente e economicamente mais complicado. Lima (2004) *apud* Costa (2013) reforça a dificuldade para implantação de um programa de monitoramento, especialmente por conta de envolver alocação de recursos humanos e financeiros para fazer as coletas e análises. Neste contexto, torna-se importante o desenvolvimento de pesquisas em busca de redes mínimas representativas de monitoramento, a fim de otimizar a relação custo/benefício e de forma viabilizar a implantação dos programas. O uso de turbidímetro diminui os custos, e com o monitoramento, este sensor faz a determinação quantitativa da turbidez, pois supõe-se possível estabelecer uma correlação entre a intensidade luminosa registrada pela célula e a concentração do material em suspensão (CARVALHO, 2004).

Com o intuito de otimizar o monitoramento hidrológico e compreender melhor o transporte de sedimentos nas águas urbanas Métadier e Bertrand-Krajewski (2012) apresentaram os resultados de um projeto de 5 anos de medições de turbidez por sensores contínuos em duas bacias hidrográficas localizadas em Lyon, na França. No projeto, que totalizou mais de 200 eventos analisados, foi aplicada uma metodologia em que a partir da série de dados brutos de turbidez chegou-se a valores de sólidos suspensos totais, concluindo que medições contínuas de turbidez paralelamente às medições da descarga do escoamento superficial são uma técnica confiável para a estimativa da carga de sólidos suspensos totais durante eventos de chuva. De fato, La-

cour et al. (2009), em pesquisa realizada também na França, em Paris, já haviam comprovado o potencial de medições contínuas de turbidez a fim de estimar valores de sólidos suspensos totais. No entanto, os autores ressaltam que as relações entre turbidez e sólidos suspensos não podem ser generalizadas e devem ser estabelecidas localmente.

3.5 Carga de Lavagem

O escoamento pluvial é considerado um dos fatores com maior influência na qualidade de água dos corpos d'água receptores, uma vez que a passagem de água pluvial é capaz de carregar uma diversa gama de poluentes que fica depositada na rede de drenagem (CHAEACKLIS, WIESNER, 1997 *apud* TEMPRANO et al., 2005), bem como na superfície impermeabilizada.

Para compreender melhor a questão, projetar soluções de controle e tratamento da poluição pluvial, assim como desenvolver estratégias de gestão das águas urbanas, é muitas vezes necessário um estudo detalhado da distribuição da carga de poluentes no escoamento superficial em diferentes escalas de tempo e locais na rede de drenagem (MOURAD et al., 2005). Fletcher e Deletic (2007) acreditam que a estimativa da carga de poluentes no escoamento superficial é o primeiro requerimento para os responsáveis pela gestão das águas urbanas compreenderem a situação local e propor soluções eficientes.

No foco da retenção e tratamento da poluição pluvial, é sugerido por muitos autores que a maior parte da carga poluidora passível de gerar danos aos ecossistemas receptores está contida no volume inicial do escoamento superficial de um evento de chuva, sendo essa característica, chamada de carga de lavagem (*first flush*) (DELETIC, 1998).

Luo (2012) define a carga de lavagem como a primeira porção do volume de escoamento, que tem por característica conter a maior fração dos poluentes do escoamento superficial em um evento chuvoso. Isso se deve porque a acumulação de sedimentos na superfície dos pavimentos nos períodos de seca antecedentes são carregados no começo do escoamento, fazendo com que o período inicial tenha um concentração de poluentes substancialmente maior que na parte final do fluxo das águas pluviais (MROWIEC et al, 2009)

É necessário ter um completo entendimento do fenômeno carga de lavagem, suas características e relações com os eventos chuvosos para que seja possível propor medidas de tratamento e técnicas compensatórias realmente eficientes para a poluição difusa da área em questão (BERTRAND-KRAJEWSK et al., 1995). Segundo Luo (2012), para tratar a poluição pluvial, os

valores dos primeiros 30-40% do volume de escoamento devem ser considerados como principal critério para as soluções estruturais serem mais efetivas e econômicas. Mrowiec et al. (2009) expõem que a importância do entendimento da carga de lavagem é evidente, uma e vez que a maior parte das substâncias potencialmente degradadoras são possivelmente transportadas no período inicial do escoamento, o que pode fazer necessário a retenção e tratamento de um volume de escoamento menor para atingir os níveis de qualidade de água desejáveis.

Weidmann (2005), objetivando reduzir a carga de poluente e melhorar a qualidade dos corpos d'água na Geórgia, sugere diversas opções de técnicas compensatórias, tais como valas de infiltração, canaletas (swales), bacia de detenção. Estas soluções focam principalmente na parte inicial do escoamento, ou seja, na carga de lavagem, considerando que tal parcela do escoamento comumente carrega a maior parte dos poluentes que estaria sendo descarregadas nos ecossistemas da região. No entanto, apesar de indicar a adoção do fenômeno como critério e parâmetro na gestão e planejamento das águas pluviais, Weidmann (2005) ressalta que os responsáveis (engenheiros, desenvolvedores, gestores) devem conhecer detalhadamente todas as características do escoamento e a carga de poluentes a fim de chegar a soluções adequadas. Tucker (2007) expõe que muitas agências reguladoras estipulam que a parcela da carga de lavagem, quando existente na região, deve ser tratada a fim de se chegar aos padrões de qualidade requeridos. No entanto, o autor ressalta que ainda há incertezas sobre a ocorrência do fenômeno, seus fatores de influência, e também como definir da melhor maneira a própria carga de lavagem.

Taebi e Droste (2004) sugerem que alguns fatores que podem ter influência para o acontecimento ou não do fenômeno, os quais incluem a área de bacia hidrográfica, intensidade da chuva, impermeabilização do solo e dias de seca antecedentes à chuva. Apesar das incertezas, diversos estudos têm reforçado a ocorrência da carga de lavagem.

3.5.1 Curva M(V)

Para uma avaliação mais clara da carga de lavagem, pode-se necessário correlacionar a fração cumulativa da massa de poluente em função da fração cumulativa do volume total do escoamento superficial. Para isso, emprega-se as chamadas “Curva M(V)”, as quais possibilitam analisar e comparar adimensionalmente diferentes eventos de chuva.

A variação da carga de poluentes no fluxo de escoamento dos eventos de chuva pode ser observada por duas curvas: o hidrograma, que é a variação da vazão no tempo, e o polutograma, o qual é a variação da concentração do poluente no mesmo intervalo de tempo (t). Essas curvas, variam de evento para evento em uma mesma bacia hidrográfica, sendo influenciadas por diversos parâmetros, como: intensidade da chuva, dias de seca antecedentes, condições do sistema de drenagem local, entre outros (TAEBI e DROSTE, 2004)

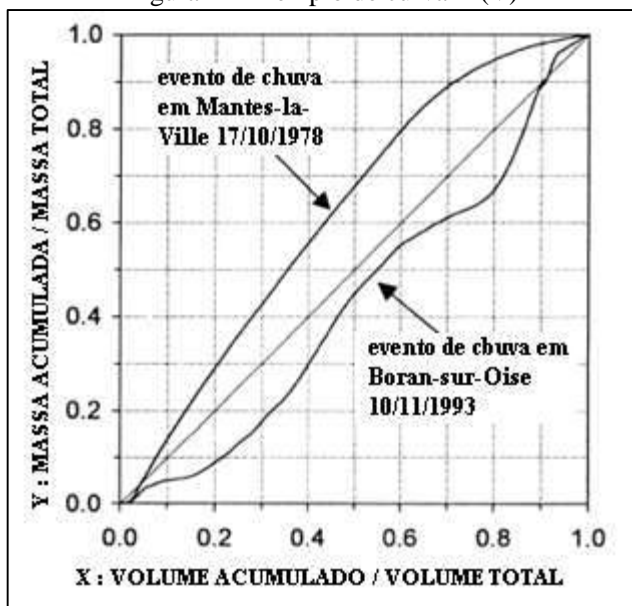
No entanto, para fazer um estudo aprofundado e comparativo da massa de poluente transportada durante o escoamento de diferentes eventos, é necessário a representação gráfica adimensional da distribuição da carga poluidora em relação ao volume escoado, ou seja, uma curva que represente a variação da massa acumulada dividida pela massa total de poluente, relacionada com o volume acumulado dividido pelo volume total (BERTRAND-KRAJEWSK et al., 1995). As curvas $M(V)$ apontam a variação da fração de poluente total removida da área de drenagem em relação a fração do volume de escoamento que já passou pela mesma área de drenagem, possibilitando comparar facilmente a carga poluente distribuída com o volume para diferentes eventos em diferentes bacia hidrográficas. Além disso, no âmbito da qualidade do escoamento pluvial que chegará aos corpos receptores, as curvas $M(V)$ apresentam o volume do escoamento necessário a ser interceptado, de modo a fornecer um padrão de qualidade de água desejado (TUCKER, 2007). Isto é, a interceptação das cargas poluentes representam um elemento fundamental no dimensionamento de medidas de tratamento e compensatórias de drenagem urbana (BERTRAND-KRAJEWSK et al., 1995).

Métadier e Bertrand-Krajewski (2012) expõem que as curvas $M(V)$ foram inicialmente utilizadas no cenário da drenagem urbana por Marsalek em 1976, e ainda hoje são amplamente utilizadas em estudos da qualidade da água do escoamento superficial, especialmente para caracterização do fenômeno da carga de lavagem. Com o passar dos anos, e o desenvolvimento de novas pesquisas, cada vez mais dados são registrados e estudados, gerando curvas $M(V)$ bastante variáveis em diferentes bacias hidrográficas. Isso sugere fortemente que a especificidade e natureza do alvo se mostram de suma importância e devem ser entendidas. Um dos fatores que influenciam nisso foram as medições feitas por sensores contínuos, exemplo do turbidímetro, fazendo com que as curvas $M(V)$ pudessem ser estabelecidas com centenas de valores ao invés de limitados valores (caso de dados coletados em amostras em diversos momentos do evento chuvoso). Desse modo, as curvas $M(V)$ apresentam formas mais complexas e representativas. Métadier e Bertrand-

Krajewski (2012) ressaltam a importância atual da utilização de sensores contínuos para o progresso do entendimento do escoamento superficial, uma vez que através do monitoramento contínuo é possível observar detalhadamente toda a dinâmica do transporte de poluente em pequenos períodos de tempo.

Exemplificando a funcionalidade das curvas $M(V)$, Bertrand Krajewski et al.(1995) apresentaram as curvas para dois eventos, o primeiro em Mantes la Ville (França) no dia 17/10/1978 e o segundo em Bouran Sur Oise (França) no dia 10/11/1993, como pode ser visto na Figura 4. Nota-se claramente, que existem diferentes correlações entre as razões massa acumulada/massa total *versus* volume acumulado/volume total dependendo da região e data de execução da análise Para o exemplo, se for necessário para atingir um objetivo, a remoção de 80% da carga de poluente em Mantes la Ville, será necessário interceptar 60% do volume escoado. Já para o evento em Boran Sur Oise, seria necessário aproximadamente 86%.

Figura 4 - Exemplo de curva $M(V)$



Fonte: adaptado de Bertrand-Krajewski et al (1995)

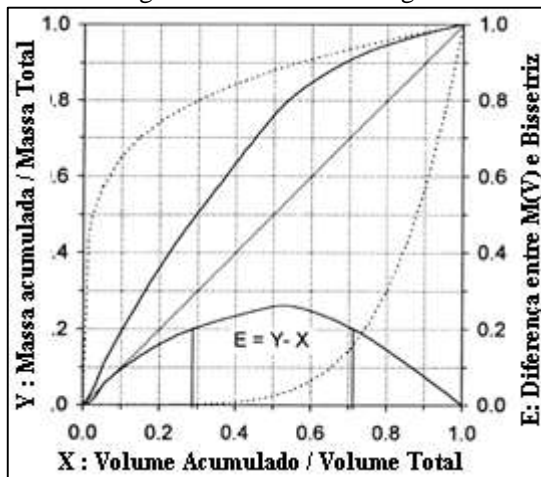
3.5.2 Métodos para cálculo da carga de lavagem

Diversos métodos já foram propostos para o cálculo da carga de lavagem. Em quase todos eles, é feito o uso da curva $M(V)$. A primeira definição proposta para o cálculo foi bastante simplista, Helsel et al. (1979) definiram que a ocorrência da carga de lavagem é considerada quando a curva $M(V)$ está acima de uma linha bissetriz 45° em qualquer momento do evento chuvoso. A linha 45° representa o caso em que a concentração de poluente permanece constante durante todo o evento. Em consequência, a diluição da carga poluidora ocorreria quando a curva $M(V)$ estiver abaixo da linha bissetriz (TUCKER, 2007). No entanto, com o aprofundamento das pesquisas na área, diversos outros autores propuseram adaptações e novos critérios para o cálculo da carga de lavagem.

3.5.2.1 Geiger (1984)

Geiger, em 1984, restringiu a definição da carga de lavagem para a curva $M(V)$ que tiver inclinação maior que 45° e quando a diferença entre a curva $M(V)$ e a linha bissetriz for maior que 0,2, sendo ela representada por uma curva “E” (BERTRAND-KRAJEWSKI et al., 1995). Exemplificando, no caso da Figura 5, a diferença $E = Y - X$ representa a diferença numérica entre a curva $M(V)$ e a bissetriz, acontecendo em todos os valores de X entre 0,29 e 0,71. Assim, segundo a teoria de Geiger, neste caso ocorre o fenômeno da carga de lavagem. Entretanto, 53% do volume deve ser interceptado para ter-se um retenção de 80% da carga de poluente. É possível entender que 53% do volume de escoamento é uma porção bastante grande para ser considerado carga de lavagem, logo para ter-se mais consistência, o método de Geiger deve considerar não só a diferença entre a curva $M(V)$ e a bissetriz, mas também a posição em que o “gap” de 0,2 se encontra em relação ao eixo do volume acumulado (BERTRAND-KRAJEWSKI et al., 1995).

Figura 5 - Método de Geiger



Fonte: adaptado de Bertrand-Krajewski et al. (1995)

Diversos autores como BertrandKrajewski et al. (1995), Tucker (2007), Shamseldin (2011) e Mrowiec et al. (2009) explicam que há inconsistência em tal método, uma vez que que essa diferença de 0,2 da curva $M(V)$ e a linha bisetritz pode ocorrer em qualquer momento, logo podendo não ser na porção inicial do escoamento.

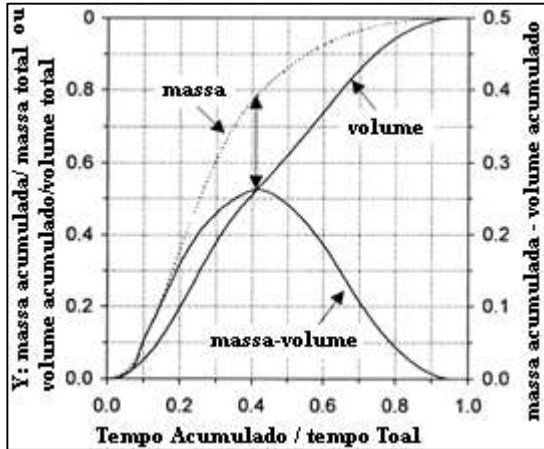
3.5.2.2 Gupta e Saul (1996)

Gupta e Saul em 1994 propuseram um novo método para caracterizar o fenômeno da carga de lavagem. Considerando carga de lavagem a porção do evento até o momento da máxima divergência entre a porcentagem da curva acumulada da carga poluente e da porcentagem da curva acumulada do volume do escoamento, ambas plotadas em relação a porcentagem acumulada do tempo t . (BERTRAND-KRAJEWSKI et al., 1995).

A diferença entre esta representação do adimensional do fenômeno com as curvas $M(V)$ é a inclusão do tempo. A variável tempo é explícita nessa metodologia e implícita para as curvas $M(V)$, onde o tempo aumenta paralelamente às curva $M(V)$.

A Figura 6 apresenta um exemplo para o método sugerido por Gupta e Saul (1994).

Figura 6 - Método de Gupta e Saul



Fonte: adaptado de Bertrand-Krajewski et al. (1995)

No exemplo apresentado, a máxima divergência entre as curvas ocorre no tempo $t = 41,3\%$ do tempo acumulado, correspondendo aos valores de $X = 0,52$ e $Y = 0,79$. Apesar de este método apresentar mais consistência que o proposto por Geiger, a maioria dos autores e pesquisas ainda fazem preferência pela utilização das curvas $M(V)$ para a caracterização do fenômeno. Segundo Mrowiec (2009) os métodos baseados na curva $M(V)$ ainda são a maneira mais apropriada e clara para descrever a carga de lavagem.

3.5.2.3 Bertrand-Krajewski et al. 1995

A metodologia mais usual encontrada na revisão de literaturas é a proposta por BertrandKrajewski et al. em 1995, em que é caracterizado o grau de intensidade do fenômeno da carga de lavagem. A teoria apresenta que toda curva $M(V)$ pode ser representada como uma função:

$$F(X) = X^b \quad (1)$$

Onde $X \in [0,1]$, $F(0) = 0$ e $F(1) = 1$. Com isso, o valor do parâmetro b caracteriza a diferença entre a curva $M(V)$ e a linha bissetriz. Para chegar aos valores de b é feita uma regressão linear na função $F(X)$, chegando a seguinte equação:

$$\ln(F(X)) = b \cdot \ln(X) \quad (2)$$

Desse modo é possível fazer uma análise estatística do parâmetro b , o qual é o fator de intensidade da carga de lavagem, para entender mais detalhadamente a distribuição da curva $M(V)$. Assim, quanto menor for o parâmetro b , mais significativa é a carga de lavagem pelo fato da maior porção da carga total de poluente ser transportada na porção inicial do volume total. O fator $b = 1$ corresponde a linha bissetriz 45° que representa a uniformidade na distribuição do volume e da carga poluidora. Já valores maiores que 1 para b , significam um maior efeito de diluição na carga poluente no volume de escoamento.

Na Tabela 2, são tabelados alguns valores de X e Y correspondentes às seis zonas na curva $M(V)$, e na Tabela 3 são detalhadas as características e intensidade do parâmetro b .

Tabela 2 - Valores de X e Y e b correspondentes as 6 zonas na curva $M(V)$

(X, Y)	b
(0.30, 0.80)	0.185
(0.78, 0.80) or (0.25, 0.30)	0.862
(0.80, 0.80) or (0.30, 0.30)	1.000
(0.82, 0.80) or (0.30, 0.25)	1.159
(0.80, 0.30)	5.395

Fonte: adaptado de Bertrand-Krajewski et al. (1995)

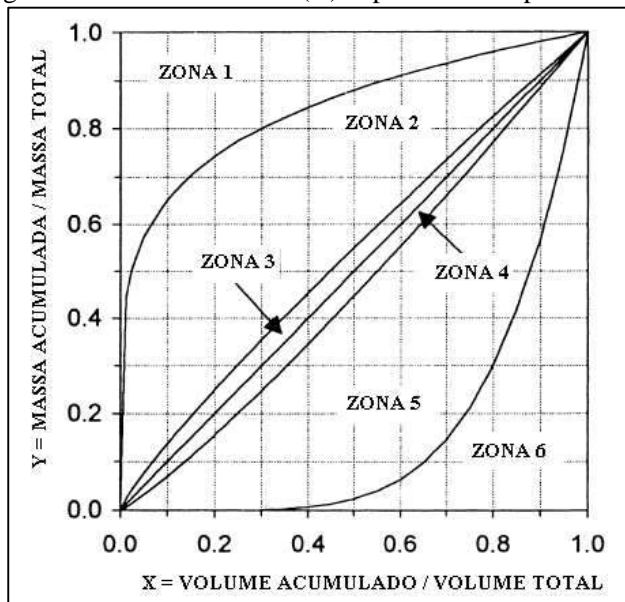
Tabela 3 - Tipologia da curva $M(V)$ e intensidade da carga de lavagem conforme o parâmetro b

Valor de b		Zona	Diferença entre a curva $M(V)$ e a reta bissetriz	
$b < 1$	$0 < b \leq 0.185$	1	diferença positiva	Forte carga de lavagem
	$0.185 < b \leq 0.862$	2		Moderada carga de lavagem
	$0.862 < b \leq 1.000$	3		Fraca carga de lavagem
$b > 1$	$1.000 < b \leq 1.159$	4	diferença negativa	Sem carga de lavagem
	$1.159 < b \leq 5.395$	5		Sem carga de lavagem e moderado retardo na descarga
	$5.395 < b \leq \infty$	6		Sem carga de lavagem e forte retardo na descarga do poluente

Fonte: adaptado de Bertrand-Krajewski et al. (1995)

A Figura 7 apresenta as zonas na curva $M(V)$ em relação ao parâmetro b .

Figura 7 - Zonas na curva $M(V)$ dependendo do parâmetro b



Fonte: adaptado de Bertrand-Krajewski et al. (1995)

Essa metodologia para definição da carga de lavagem pode ser considerada de alta relevância, pois é simples e explícita e também permite o cálculo do fenômeno de uma maneira numérica e descritiva, motivos que fazem ser a metodologia mais aplicada em estudos da carga de lavagem. Exemplificando, pesquisadores como SHAMSELDIN (2011), MROWIEC et al. (2009), TUCKER et al. (2007), LEE et al. (2002), utilizaram a metodologia em questão.

3.5.3 Estudos de Casos do fenômeno da carga de lavagem baseado na Curva $M(V)$

3.5.3.1 Estudo de Caso em Czystochowa – Polônia -

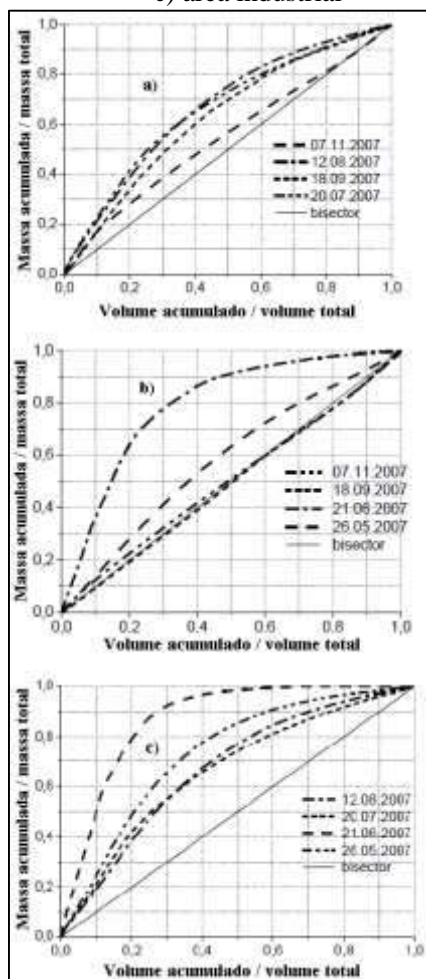
Mrowiec et al. (2009) observaram o fenômeno da carga de lavagem para o parâmetro sólidos suspensos totais em uma bacia hidrográfica localizada no centro do distrito de Czystochown, na Polônia. A bacia do estudo foi subdividida em 3 sub-bacias com as seguintes características:

- Área industrial: 3,4 hectares; 72% do solo impermeável e declividade média 0,5%
- Área Urbanizada: 2,38 hectares, 56% do solo impermeável e declividade média 4,0%
- Área unicamente residencial: 2,0 hectares, 22% do solo impermeável e declividade média 1%

Foram analisados 4 eventos chuvosos por área. Para cada sub-bacia foi plotado as curvas adimensionais $M(V)$ da carga de poluente acumulada vs o volume de escoamento acumulado.

Mrowiec considerou para análise o método sugerido por Bertrand-Krajewski et al. (1995) As curvas apontaram que a carga de lavagem é mais acentuada nas áreas de maior impermeabilização. Exemplificando, na área residencial, 2 dos 4 eventos tiveram distribuição proporcional dos sólidos suspensos totais durante as chuvas. Já para a área industrial, um dos eventos apresentou forte carga de lavagem (mais de 90% da carga poluente em 30% do volume) e nos outros 3 eventos ocorreu moderada carga de lavagem (80% da carga poluente entre 42%-58%). A Figura 8 ilustra os resultados obtidos.

Figura 8 - Curva Adimensional M(V) para a) área urbana b) área residencial c) área industrial



Fonte: adaptado de Mrowiec (2009)

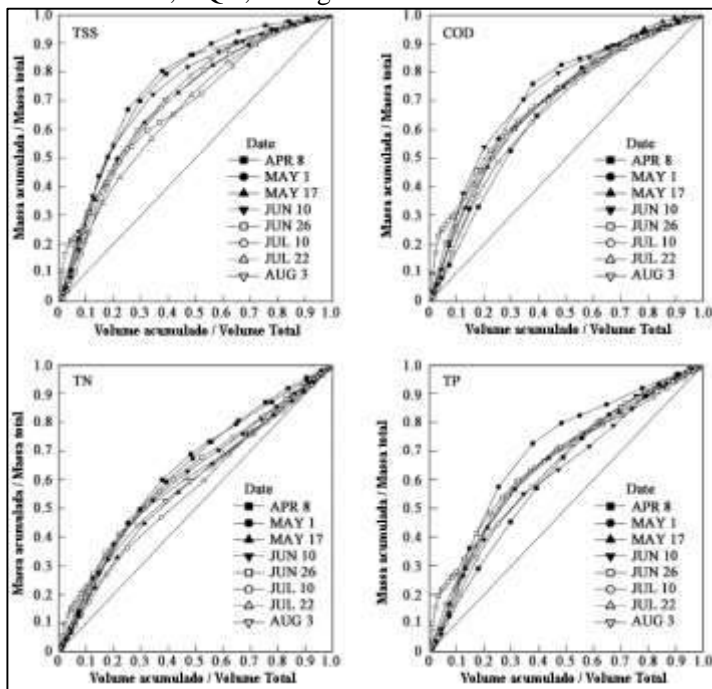
Com a utilização do critério proposto por Bertrand-Krajewski de 30/80 (80% da carga do poluente transportado nos primeiros 30% do volume escoado) para ser considerado como forte ocorrência do fenômeno, o autor conclui que esta situação é um caso raro na bacia hidrográfica de Czeszowa (ocorreu 1 vez em 6 eventos). Além disso, segundo Mrowiec et al.

(2009) a distribuição da carga de sólidos suspensos totais depende da intensidade da chuva, assim como da permeabilidade do solo e do período de seca antecedente ao evento chuvoso. Por fim, o autor acredita que as informações obtidas do presente estudo não possibilita assumir que a maior parte dos poluentes podem ser retidos simplesmente capturando o volume da carga de lavagem. Portanto, deve-se aprofundar mais nas investigações da ocorrência do fenômeno, definir seu volume e duração para então sim, considerar como um parâmetro confiável no dimensionamento de estruturas compensatórias mais econômicas e eficientes.

3.5.3.2 Estudo de Caso em Wuhan – China

Devido à rápida urbanização da China, muitos corpos d'água se tornaram degradados, o que requereu muita atenção para o controle da poluição urbana causada pelo escoamento superficial (LI et al., 2007). Por tal questão, foi feito um estudo para caracterizar as descargas de poluentes no escoamento pluvial e relacionar os tais processos com os padrões de chuva na bacia hidrográfica de Shilipu, na cidade de Wuhan (China). A bacia é tipicamente urbana, com 85% do solo impermeável. Assim, foram feitas análises em 8 eventos chuvosos e conclui-se que a carga de poluente transportada não foi proporcional ao volume de escoamento, como é possível ver nas curvas $M(V)$ da Figura 9, uma vez para os quatro parâmetros analisados em todos eventos de chuva a curva $M(V)$ está acima da reta bissetriz, sugerindo que a maior fração da carga poluidora é carregada no volume inicial do escoamento.

Figura 9 - Curva Acumulativa M(V) para os parâmetros Sólido Suspensos Totais, DQO, Nitrogênio Total e Fósforo Total



Fonte: adaptado de Li et al. (2007)

Para esse caso, interceptando os primeiros 30% do volume de escoamento, é possível obter uma remoção média de 62,4% dos Sólidos suspensos totais, 59,4% da DQO, 46,8% do Nitrogênio Total e 54,1% do Fósforo Total. Por fim, Li et al. (2007) sugerem que a carga de lavagem mais acentuada está proporcionalmente relacionado com a quantidade de dias de seca antecedente, principalmente em relação aos sólidos suspensos totais. Além disso, o autor acredita que o fato de se ter trabalhado em uma área altamente impermeabilizada levou a valores significantes para o fenômeno. Já em relação a intensidade da chuva, no estudo em questão, o autor não pode relacionar proporcionalmente a intensidade do evento com a carga de lavagem.

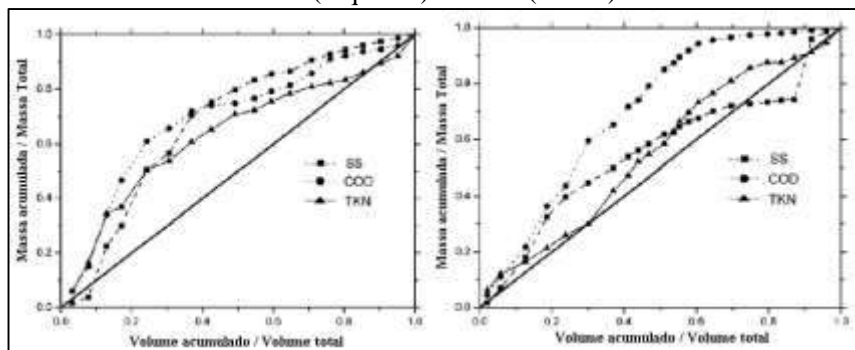
Por fim, o autor ratifica que a carga de lavagem na bacia em questão é um estudo fundamental para a redução da poluição pluvial e a interceptação de 30% do volume de escoamento pode ser uma solução efetiva e econômica para o tratamento das águas pluviais.

3.5.3.3 Estudo de Caso Santander – Espanha

Temprano et al. (2005) apresentaram um estudo para a bacia hidrográfica de Santander, na Espanha, a fim de prever a poluição pluvial da região. Diante da possibilidade da existência do fenômeno da carga de lavagem, o autor faz a análise dos parâmetros sólidos suspensos, DBO e NTK em dois eventos de chuva.

A bacia de Santander é uma área urbana residencial e possui 34% do solo impermeável. Para o estudo, também foi utilizado o método da curva adimensional $M(V)$, cujos dados obtidos são apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Curva acumulativa $M(V)$ para SS, DBO e NTK para o evento 06/04(esquerda) e 27/02 (direita)



Fonte: adaptado de Temprano et al. (2005)

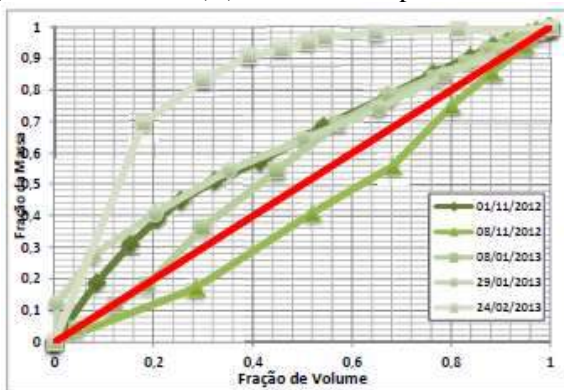
Ambos os eventos chuvosos tiveram aproximadamente o mesmo número de dias de seca antecedentes, porém o evento do dia 27/02 foi de maior intensidade que o evento do dia 06/04.

Para o evento do dia 27/02 em 30% do volume de escoamento foi acumulado 60% para DBO, 45% para sólidos suspensos e 30% para NTK. Já para o evento do dia 06/04, os valores foram 65%, 57% e 54% para DBO, sólidos suspenso e NTK, respectivamente. Logo, apesar de ter uma intensidade maior, o evento do dia 27/02 apresentou menor efeito da carga de lavagem. Assim, o autor não concluiu uma relação concreta entre o fenômeno e a intensidade da chuva.

3.5.3.4 Estudo de Caso Brasília - Brasil

Costa (2013) fez um estudo da ocorrência da carga de lavagem em duas sub-bacias denominadas de C.O e Iate, com 5,42 e 8,82km², respectivamente. Foi estudada a possibilidade da implementação de bacias de retenção para atenuação da carga de poluentes, e com isso melhorar a qualidade da água do escoamento superficial da região. Ambas as sub-bacias estão localizadas na bacia hidrográfica do Lago Paranoá, região central do Distrito Federal. A Figura 11 representam as curvas M(V) utilizadas para avaliação da carga de lavagem para o parâmetro sólidos suspensos sub-bacia C.O.

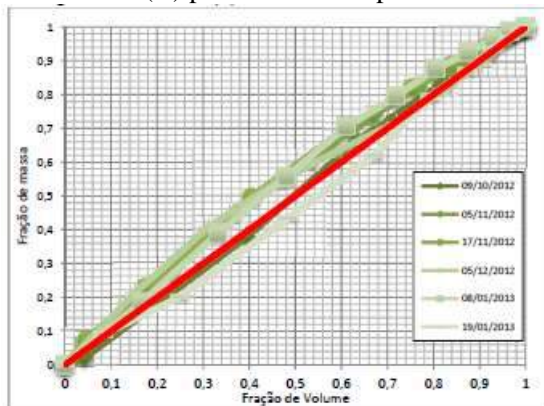
Figura 11 - Curva M(V) de sólidos suspensos da bacia C.O



Fonte: Costa (2013)

Para a sub-bacia C.O, somente um evento não apresentou o fenômeno. Por exemplo, para o evento do dia 24/02, caso 20% do volume fosse interceptado, teria sido retido 70% da carga de sólidos suspensos. Para esta bacia, o autor identificou relação da carga de lavagem com os dias antecedentes de seca, uma vez que o dia 24/02/2013 (teve 21 dias de seca antecedente e apresentou a carga de lavagem) e o evento do dia 08/11/2012 (com apenas 2 dias antecedentes sem chuva) apresentou apenas 15% da carga de sólido dos primeiros 30% do volume. Em relação a bacia Iate, a Figura 12 apresenta as curvas M(V) para o parâmetro sólidos suspensos. Para a sub bacia Iate, não foi encontrado grande intensidade da carga de lavagem. Assim a autora sugere que para implementação de uma bacia de retenção, seria necessário um estudo mais detalhado para remoção desses poluentes.

Figura 12 - Curva M(V) para Sólidos Suspensos na sub bacia Iate



Fonte: Costa (2013)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho teve por objetivo analisar a ocorrência do fenômeno da carga de lavagem do parâmetro turbidez. As análises ocorreram na entrada de uma vala de infiltração, utilizada como estrutura compensatória de drenagem urbana. Tal estrutura de drenagem, faz parte das pesquisas do projeto “Contaminação de Solos e Águas Subterrâneas Provenientes de Estruturas de Controle da Drenagem Urbana Baseadas em Infiltração”. O projeto é coordenado pela Professora Doutora Alexandra Rodrigues Finotti, professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina e recebe financiamento do CNPq.

O trabalho foi realizado em três etapas: Primeiramente, revisão bibliográfica para levantamento de métodos de avaliação da carga de lavagem, estudos de casos semelhantes e escolha do método mais apropriado a ser empregado. Posteriormente, foi feita a seleção e análise dos dados para cada evento chuvoso através da criação dos hietogramas, hidrogramas, polutogramas e curvas M(V). Na terceira etapa, foi analisada a ocorrência e intensidade do fenômeno da carga de lavagem para o parâmetro de turbidez através dos critérios escolhidos e pôr fim, foram feitos testes estatísticos para avaliar as correlações dos resultados com características de cada evento de chuva estudado. A Figura 13 ilustra procedimento metodológico para os objetivos desta pesquisa.

Figura 13 - Quadro síntese do processo metodológico

Objetivo Geral**Objetivo Específico****Materiais e Métodos****Resultados**

Analisar a ocorrência do fenômeno da carga de lavagem na área de contribuição de uma vala de Infiltração, localizada no Distrito do Campeche (Florianópolis/SC)



Avaliar a correlação da intensidade da carga de lavagem com os parâmetros quantitativos de precipitação e escoamento superficial



Revisão Bibliográfica

Definição dos eventos de chuva

Tratamento dos dados

Representatividade dos dados

Elaboração dos hietogramas, hidrogramas, polutogramas e curvas M(V)

Avaliação da ocorrência da carga de lavagem e cálculo da intensidade do fenômeno

Tabela síntese com as características dos eventos e intensidade da carga de lavagem

Análise estatística da correlação da carga de lavagem com os dados quantitativos dos eventos

Comparação individual através da representação gráfica da característica do evento em relação aos valores de *b*



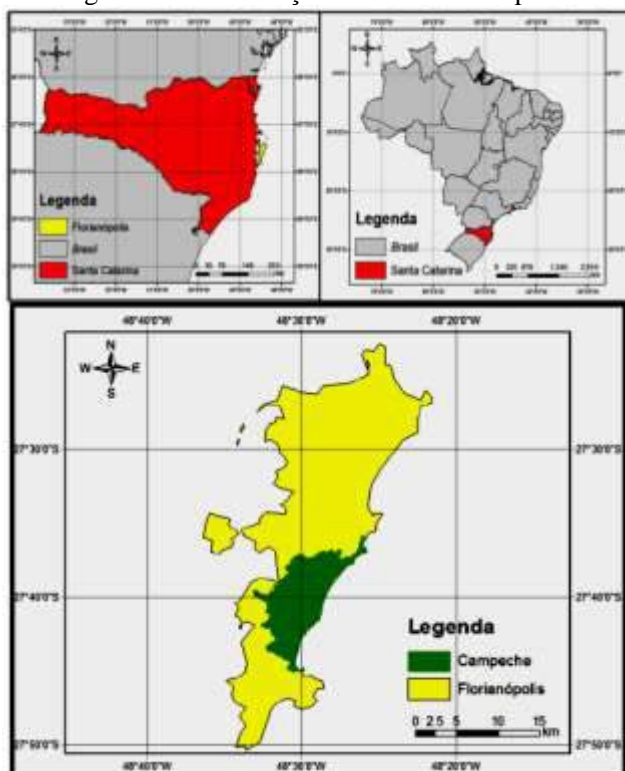
Enquadramento dos 28 eventos de chuva nas zona de intensidade da carga de lavagem

Possíveis relações para esclarecer a ocorrência ou não da carga de lavagem

4.1 Caracterização da área de estudo

A vala de infiltração, local de onde foram feitas as análises para este estudo, está localizada no Distrito do Campeche, região insular do município de Florianópolis, capital do Estado de Santa Catarina. Mais especificamente, entre as coordenadas 27°10' e 27°50' Sul, e entre 48°25' e 48°35' Oeste (Florianópolis, 2011). A Figura 14 representa a localização do distrito do Campeche.

Figura 14 - Localização Distrito do Campeche



Fonte: Pacheco (2015)

O Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico de Florianópolis (FLORIANÓPOLIS, 2011) estabeleceu as Unidades Territoriais de Planejamento (UTP), como unidade de gestão do território baseada nas bacias hidrográficas, onde o distrito do Campeche está localizado em duas UTP's: A UTP do Rio Tavares e a UTP do Morro das Pedras.

A Bacia hidrográfica do Rio Tavares possui área total de 49.238,504 m², tendo nascentes localizadas ao leste do maciço central e sua foz no mangue do Rio Tavares na baía Sul. O Rio Tavares em seu trajeto da nascente até a foz recebe contribuição tanto de áreas com grande biodiversidade quanto áreas altamente urbanizadas (PACHECO, 2015).

Já Bacia Hidrográfica do Morro das Pedras possui uma área de drenagem de 10.798,994 m², aglomerando tanto as áreas de preservação das Dunas do Campeche como toda a faixa costeira (PACHECO, 2015).

Ambas as bacias a qual o distrito do Campeche pertence estão sobre o Aquífero do Campeche, que tem seu abastecimento principalmente proveniente da infiltração direta das águas pluviais e recarga artificial dos sistemas de disposição de efluentes locais. Com menor influência, também é considerado as perdas do sistema de abastecimento de água no abastecimento do aquífero (PACHECO, 2012). Assim, esta área é de bastante importância no âmbito da drenagem urbana e das técnicas compensatórias, visto que está sobre um aquífero bastante dependente da infiltração do escoamento superficial. Desse modo, as estruturas de infiltração existentes da região são um fator essencial para a manutenção da qualidade ambiental desse ecossistema.

Com a ideia de reduzir o escoamento superficial da região, foi feita na década de 70 uma vala de infiltração pela prefeitura de Florianópolis, na Avenida pequeno Príncipe, no quilômetro 2. Sua área de contribuição direta está localizada na bacia hidrográfica do Rio Tavares, com aproximadamente 17.900 m², sendo composta por área mista: ocupação comercial, residencial e de alto fluxo de veículos, como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Área de contribuição da vala de infiltração



Fonte: Pacheco (2015)

A região de estudo passou por um rápido processo de urbanização nos últimos anos, através da construção de diversos empreendimentos comerciais e condomínios habitacionais. Além dos habitantes locais, a avenida Pequeno Príncipe tem um elevado fluxo de carro devido à proximidade da praia do Campeche, local que atrai muitos turistas para a região. Pacheco (2015) fez o levantamento topográfico da área de contribuição da vala, considerando todos os elementos de drenagem, como bueiros, bocas de lobo, tubulações, canaletas e as áreas permeáveis e impermeáveis e concluiu que a área possui 79,8% de área impermeável e 20,15% de área permeável, formada por solo exposto arenoso.

O sistema de drenagem do local é composto por diversas galerias, as quais tem seu início no começo da área de contribuição e carregam o escoamento até a vala de infiltração através de uma tubulação de 60cm de diâmetro. Após a passagem através da vala e do fenômeno de infiltração, o escoamento pode continuar por uma tubulação de 50cm de diâmetro a jusante. As características da vala são apresentadas na Tabela 4 e na Figura 16 é possível visualizar a vala de infiltração que recebe o escoamento do presente estudo.

Tabela 4 - Características da vala de infiltração

Dimensões da Vala de Infiltração	
Comprimento (m)	10,5
Largura Superior (m)	2,9
Largura inferior(m)	1,6
Profundidade	1,1
Área do fundo d vala (m ²)	16,8

Fonte: Pacheco (2015)

Figura 16 - Vala de Infiltração - Avenida Pequeno Príncipe



Fonte: Pacheco (2015)

4.2 Instrumentalização e Monitoramento do Escoamento Superficial

Para o presente trabalho, foram utilizados dados secundários fornecidos pelo Laboratório de Águas Urbanas e Técnicas Compensatórias (LAU-TEC), que realiza o monitoramento da vala de infiltração há aproximadamente 4 anos. Os instrumentos utilizados para o monitoramento quantitativo e qualitativo dos dados necessários para esta pesquisa, assim como o período de monitoramento são apresentados na Tabela 5. Já a Figura 17 apresenta

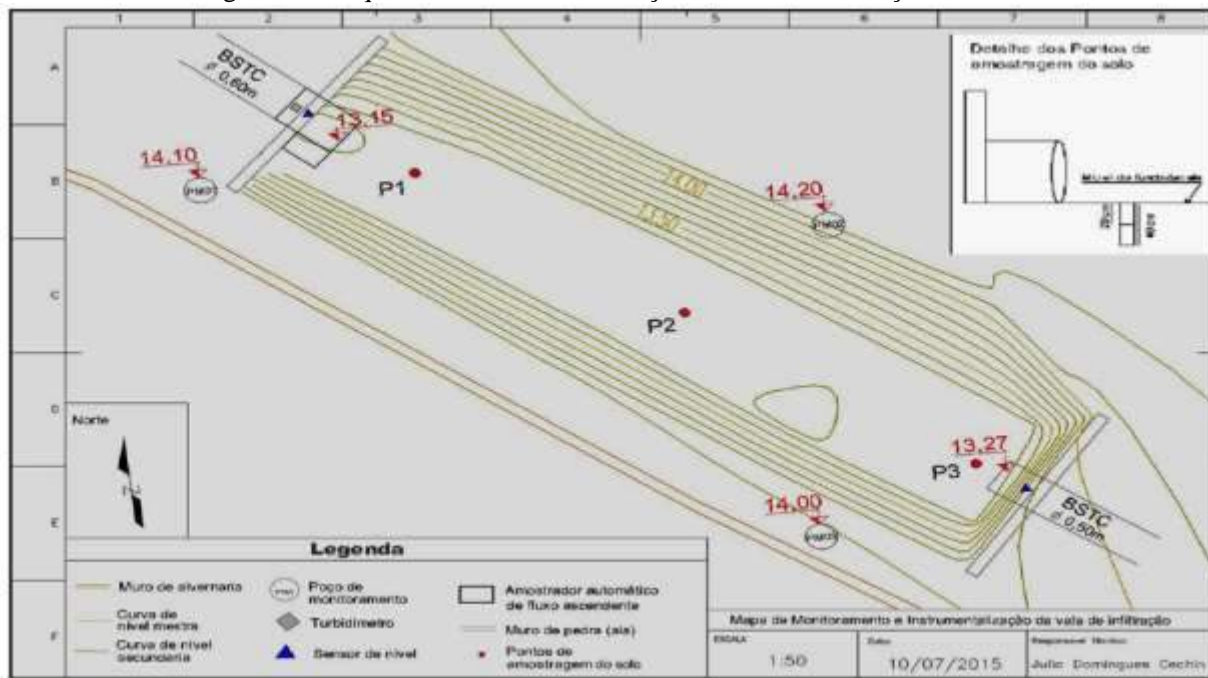
um croqui da instrumentalização da vala de infiltração. O pluviógrafo, utilizado para as medições da precipitação está instalado em um lote residencial ao lado da vala de infiltração, por medidas de segurança do data logger. O turbidímetro e o sensor de nível utilizados nesta pesquisa estão instalados na entrada da vala de infiltração. O nível da água e os valores de turbidez foram medidos na grande maioria do tempo de monitoramento a cada cinco minutos. Em alguns períodos, as medições foram feitas a cada três minutos

Tabela 5 - Instrumentação da vala de infiltração

Instrumento	Monitoramento	Período monitorado/9.
Pluviógrafo - SL200P	Variação temporal da precipitação	04/2014 até 04/2015
Sensor de Nível e Vazão Submersível - SL2000NV	Vazão de entrada e saída da tubulação	07/2014 até 04/2015
Data logger	Coleta e armazenamento dos dados do pluviógrafo e dos sensores	-
Turbidímetro-SL 2000-TS	Turbidez	07/2014 até 04/2015

Fonte: adaptado de Pacheco (2015)

Figura 17 Croqui com a instrumentalização da vala de infiltração



Fonte: Pacheco (2015)

4.3 Definição dos eventos de chuva

Para definição dos eventos, foram utilizado os princípios da definição de evento de chuva estabelecidos por Métadier e Bertrand-Krajewski (2012), definidos a partir de um estudo de cinco anos de medições contínuas de turbidez, feitas em Lyon na França. Assim, para o presente trabalho, o início e o final dos eventos são definidos conforme os seguintes critérios:

- i) Início e fim de registro de vazão do escoamento superficial chegando a montante da vala de infiltração;
- ii) Dois eventos são considerados independentes caso ocorra um período de pelo menos quatro horas entre os registros de precipitação.
- iii) A duração entre o começo da precipitação e o início da vazão a montante da vala deve ser menor que duas horas

4.4 Tratamento dos dados para carga de lavagem

Neste estudo, o banco de dados de Turbidez foi tratado a fim de obter a variação percentual dos valores de turbidez para cada evento em específico. Como o objetivo do estudo da carga de lavagem é observar se na parte inicial do escoamento superficial é o momento de maior porcentagem da concentração de turbidez naquele evento, para cada caso foi observado o valor mínimo de turbidez medido em NTU no evento de chuva e cada medição de turbidez do mesmo evento foi subtraída pelo valor mínimo. Ou seja, na avaliação do fenômeno da carga de lavagem, o fator essencial é a variação das concentrações medidas de turbidez. Dessa maneira, evita-se que em casos de altas concentrações de turbidez, as variações de concentração (em termos de porcentagem) dentro do evento sejam mascaradas.

Os valores trabalhados de turbidez foram utilizados na metodologia escolhida para fazer a turbidez acumulada, que é um dos parâmetro de entrada na elaboração das curvas $M(V)$. Logo, obtêm-se a porcentagem (em relação ao evento em particular com suas características) da carga de turbidez que já foi transportada em cada momento em relação a carga total.

4.4.1 Representatividade dos dados

No período de 31/07/2014 até 31/07/2016 o Laboratório de Águas Urbanas e Técnicas Compensatórias registrou dezenas de eventos de chuva. No

entanto, dados medidos por sensores contínuos, como no presente trabalho, precisam ser analisados individualmente para serem validados.

Mourad e Bertrand (2002) ressaltam que séries de dados emitidas por sensores no estudo da hidrologia urbana, mesmo que dos mais sofisticados equipamentos, apesar de serem mais confiáveis que o método de coleta tradicional, precisam ser manualmente estudados (até que se tenha desenvolvido um sistema de pré-validação de dados automatizado, porém não é o caso nesta pesquisa) e validados com o auxílio da base de dados e ferramentas de visualização gráficas, uma vez que o uso de dados duvidoso ou falsos podem levar a conclusões errôneas e dificultar o entendimento do comportamento dos fenômenos analisados.

Desse modo, cada evento durante o período de análise, foi estudado individualmente, para se ter certeza de que os dados representam corretamente o escoamento superficial e suas características. Além da visualização gráfica individual, foi feito a comparação de valores com o banco de dados registrado ao longo dos anos na vala de infiltração e coleta de informações sobre períodos em que algum equipamento não esteve calibrado, gerando assim dados inconsistentes.

4.4.2 Concentração Média do Evento

A concentração média do evento resume a relação entre a massa de poluente transportada pelo volume de água escoado, sendo dessa forma, uma representação concisa de um conjunto de dados variáveis, facilitando a comparação entre diferentes eventos (NOVOTNY, 1991 *apud* COSTA, 2013). Assim, com o intuito de avaliar a influência de diferentes concentrações de turbidez na ocorrência da carga de lavagem, foram calculadas a concentração média do evento utilizando a seguinte equação:

$$CME = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T C_t Q_t dt}{\int_0^T Q_t dt} \cong \frac{\sum C_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t} \quad (3)$$

4.4.3 Eventos analisados

Após análise individual do banco de dados de precipitação, turbidez e vazão, concluiu-se pelo descarte de alguns eventos devido a: falhas na medição da vazão de escoamento, ou falhas na medição de turbidez com valores duvidosos ou constantes devido a problemas técnicos ou descalibração no turbidímetro. Além dos problemas técnicos na instrumentação, em alguns casos, os eventos de chuva foram muito pequenos com escoamento superficial insignificante, sendo assim, também foram desconsiderados.

Posteriormente, os dados validados foram delimitados conforme os critérios já citados, totalizando 28 eventos de chuva. A Tabela 6 apresenta todos os eventos validados para esta pesquisa.

Tabela 6 - Eventos selecionados

Evento	Data
1	01/08/2014
2	04/08/2014
3	12/08/2014
4	16/08/2014 - I
5	16/08/2014 II
6	16/08/2014 III
7	25/08/2014
8	31/08/2014
9	02/09/2014
10	03/09/2014 - I
11	03/09/2014-II
12	24/09/2014
13	26/09/2014
14	28/09/2014
15	13/10/2014
16	04/11/2014
17	06/11/2014
18	08/11/2014
19	22/11/2014
20	25/11/2014 - I
21	25/11/2014 - II

22	03/12/2014 - I
23	03/12/2014 - II
24	03/12/2014 - III
25	12/12/2014
26	15/01/2015
27	04/02/2015 - I
28	13/02/2015

Os dias 16/08/2014, 03/09/2014, 25/11/2014 e 03/12/2014 foram separados em mais de um evento pois tiveram pausas no escoamento superficial, e horas mais tarde aconteceu nova precipitação e posteriormente foi registrado variação nos sensores de nível (indicativo de vazão de escoamento), logo foi considerado um novo evento a ser avaliado independente do anterior.

4.4.4 Parâmetros quantitativos considerados na análise da carga de lavagem

Para o maior entendimento do comportamento e distribuição da carga de turbidez ao longo do escoamento superficial, foi analisado a possível correlação da intensidade da carga de lavagem com alguns parâmetros quantitativos de cada evento deste estudo. A Tabela 7 apresenta os parâmetros avaliados.

Tabela 7 - Parâmetros quantitativos dos eventos de chuva

Precipitação Total (mm)	Soma de todas as precipitações durante o evento obtidos pelo pluviógrafo
Tempo de precipitação (min)	Intervalo entre o início e o fim da precipitação
Precipitação máxima (mm)	Máximo valor de precipitação registrado em 5 minutos (intervalo de leitura do pluviógrafo)
Intensidade Média (mm/h)	$I = (\text{Precipitação total} \div \text{Tempo de precipitação}) \times 60$

Intensidade Máxima em 5min (mm/h)	$I_{max} = (\text{Precipitação máxima} \div 5) \times 0,083$
Tempo de escoamento (min)	Intervalo entre o início do escoamento superficial e o fim do escoamento superficial na entrada da vala
Tempo de escoamento após início da precipitação(min)	Tempo observado do início do escoamento superficial após o início da precipitação
Dias antecedentes sem chuva	Números de dias de seca antecedente ao evento de chuva
Vazão (m³/h)	Obtida através da variação dos sensores de nível
Vazão máxima (m³/h)	Vazão máxima no do escoamento superficial a montante da vala do início ao final do evento
Volume no tempo t (m³)	$\text{Volume} = \text{Vazão} \times (5 \div 60)$
Volume Acumulado total (m³)	Volume de água acumulado que foi transportado no escoamento superficial do início ao final do evento
Concentração Média do Evento	Somatório da relação da massa de poluente transportado pelo volume de água escoado em todos intervalos de tempo
Valor de b para	Valor obtido pela regressão linear das curvas $M(V)$ conforme Bertrand-Krajewski et al. 1995

4.5 Avaliação do fenômeno da carga de lavagem

O método de Bertrand-Krajewski et al. (1995) adotado para investigação do fenômeno da carga de lavagem foi definido a partir da revisão bibliográfica

por ser o método mais difundido no meio acadêmico, facilitando a comparação dos resultados com outras bibliografias disponíveis.

4.5.1 Curva M(V)

A curva M (V) apresenta a variação da massa de poluente transporta durante o escoamento superficial. É necessário a criação de uma representação gráfica adimensional, ou seja, uma curva que represente a variação da massa acumulada dividida pela massa total de poluente, relacionada com o volume acumulado dividido pelo volume total.

Inicialmente, faz-se necessário a elaboração de dois gráficos: o hidrogramas e o polutogramas para cada evento. Para a elaboração do hidrogramas, foi utilizado os dados obtidos a partir dos sensores de nível que possibilitaram estimar a vazão de chegada na vala de infiltração. Assim, é feito a plotagem em um gráfico os dados de vazão no eixo das abcissas em relação a variação do tempo no eixo das ordenadas. Por conseguinte, é possível encontrar a variação da vazão do escoamento superficial na tubulação a montante da vala ao longo do tempo do evento de chuva

Com metodologia semelhante, também é feito a elaboração dos polutogramas para cada evento analisado. Foram utilizados os dados obtidos pelo turbidímetro e plotado os valores de turbidez no eixo das abcissas e a variação do tempo no eixo das ordenadas. Em consequência, é obtido o polutograma de cada evento, o qual representa a variação da carga de turbidez no mesmo tempo (t) que foi relacionado os valores de vazão.

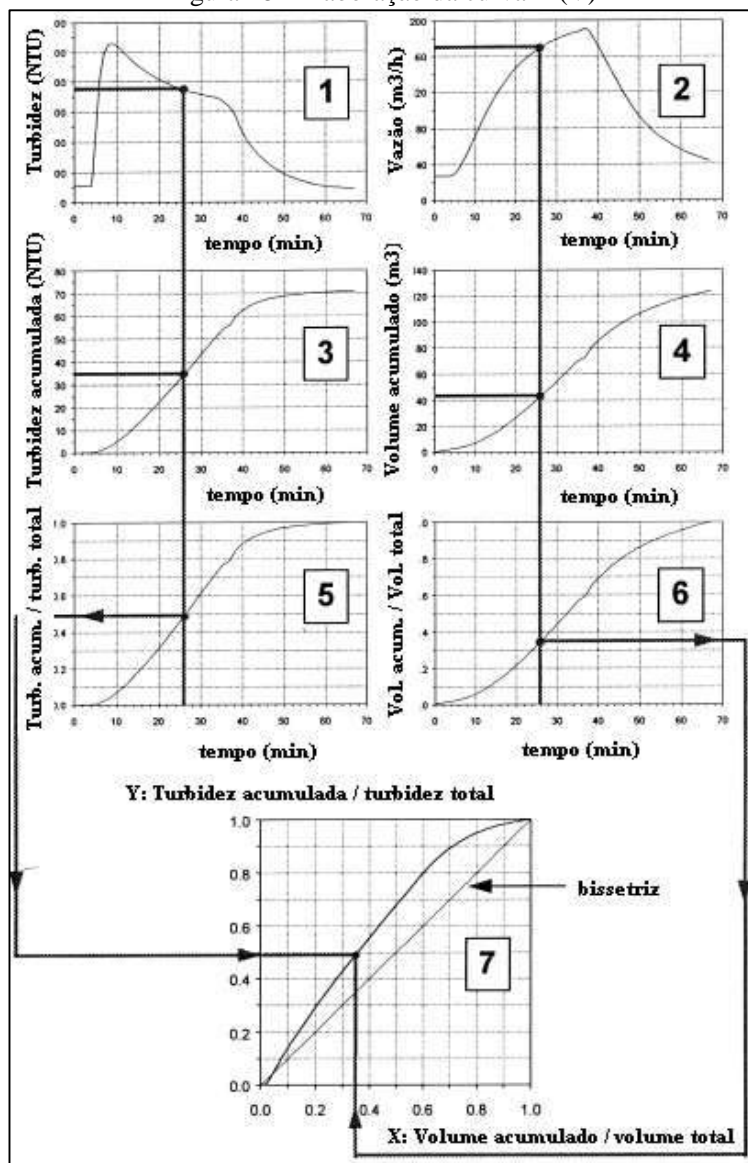
Posteriormente, deve-se elaborar os gráficos representativos de volume acumulado no tempo t e da massa acumulada no mesmo tempo t . Sendo assim, a parte final é representar adimensionalmente a variação dos valores de massa acumulada dividida pela massa total e relacioná-la com o volume acumulado dividido pelo volume total, sendo expressa pelas seguintes funções:

$$\begin{aligned} M' &= m(t)/M & (4) \\ V' &= v(t)/V & (5) \end{aligned}$$

Onde $m(t)$ e o $v(t)$ são, respectivamente, o acumulado da massa de poluente e o acumulado do volume de escoamento no tempo t durante o evento chuvoso, e M e V são o total de carga poluente e total do volume de escoamento

durante todo o evento. Os máximos valores para M' e V' são 1, o qual corresponde a 100% do volume ou da carga de turbidez. A Figura 18 ilustra a elaboração de uma curva $M(V)$ mais detalhadamente.

Figura 18 - Elaboração da curva M(V)



Fonte: adaptado de Bertrand-Krajewski et al. (1995)

4.5.2 Critérios para ocorrência da carga de lavagem

Além da escolha da metodologia das curvas $M(V)$, ainda é necessário estabelecer um critério para a ocorrência da carga de lavagem, uma vez que alguns autores divergem opiniões para sinalizar a ocorrência ou não do fenômeno.

A maneira convencional de definir a ocorrência do fenômeno é comparar a fração total da carga poluente com a fração total do volume de escoamento, ambos calculados para o mesmo ponto do volume acumulado. Em outras palavras, uma vez que o estudo da carga de lavagem pode ser utilizado como um parâmetro para projetar estruturas de detenção e tratamento que interceptem “a maior porção da carga poluidora” através da interceptação da “parte inicial da porção do volume de escoamento”, faz-se necessários que esses dois termos sejam detalhados e calculados mais especificamente.

Em paralelo a metodologia dos valores correspondentes ao fator de intensidade b proposta por Bertrand-Krajewski et al. (1995) apresentada anteriormente, o autor também sugere que para o fenômeno da carga de lavagem ocorrer com alta intensidade, pelo menos 80% da carga poluente deve ser transportada nos primeiros 30% do volume escoado. Essa teoria é chamada de 30/80 FF (first flush), que corresponde a valores de b abaixo de 0,185. Os valores 30 e 80 foram sugeridos por BertrandKrajewski et al. (1995). Apesar de alguns outros autores indicam valores diferentes, mais e menos restritivos, a maior parte dos pesquisadores, como LI et al., 2007; TEMPRANO et al., 2005, MROWIEC et al., 2009, MCCARTHY 2009, entre outros, utilizam o critério 30/80 FF, usando o momento em que 30% do volume foi descarregado como indicador para avaliar a carga de lavagem para diferentes parâmetros e eventos de chuva.

A adoção desta metodologia permite que o presente trabalho realizado na região sul de Florianópolis, em uma bacia hidrográfica urbanizada, possa ser comparado com outros estudos de caso em diferentes locais. Assim será adotado para via de classificação da intensidade do fenômeno o momento do escoamento em que 30% do volume acumulado já foi descarregado.

Os cálculos e análises estatísticas foram realizados com o auxílio dos programas Excel 2013 e Statistica 2007.

4.5.3 Análise estatística

Foram realizadas análises do grau de correlação entre as características quantitativas dos eventos de chuva apresentadas na Tabela 7 e a intensidade da carga de lavagem (valor de b) no momento em que 30% do volume foi escoado. Foram feitos dois testes estatísticos, um paramétrico e um não paramétrico. Primeiramente, foi realizada a correção de Pearson (correlação paramétrica), que mede o grau da correlação linear entre duas variáveis. O segundo teste utilizou a correlação de Spearmann (correlação não paramétrica), que não supõe que a relação entre as variáveis sejam necessariamente lineares.

Para ambos os testes, é obtido um valor de p e R . O valor de p indica se existe correlação significante entre as variáveis. Apenas as correlações que obtiverem valores de $p < 0,05$ são consideradas estatisticamente significativas. (DELETIC, 1998; MCCARTHY, 2009; LI et al, 2007, STATSOFT, INC, 2007). Os valores variam de -1 até 1, sendo que quanto maior o valor absoluto, maior o grau de correlação. Por exemplo, um valor absoluto de $R = 1$ indica que os dados são perfeitamente lineares e um valor absoluto de $R = -1$ indica que o maior valor de uma variável “X” está associado ao menor valor de uma variável “Y”, já o segundo maior valor da variável “X” está associado ao segundo maior valor da variável “Y” e assim sucessivamente. Já o sinal positivo ou negativo, é indicativo da direção da relação entre as variáveis. Se ambas variáveis tendem a aumentar ou diminuir juntas, o coeficiente R é positivo, já se o uma variável tende a aumentar assim como a outra a diminuir, o valor de R é negativo (STATSOFT, INC, 2007)

5 RESULTADOS

A aplicação da metodologia permitiu selecionar e analisar 28 eventos de precipitação e escoamento na entrada da vala. A Tabela 8 traz os dados dos eventos bem como os resultados das análises da carga de lavagem. Nos itens seguintes são discutidos os elementos que compõem a Tabela 8.

Tabela 8 - Síntese das características dos eventos analisados

Evento	Tp (min) 1	Tesc (min) 2	Tiesc. (min) 3	Dias sem chuva 4	Prec. (mm) 5	I (mm/h) 6	I máx. (mm/h) 7	V. Acum. (m3) 8	Q máx. (m3/h) 9	CME 10	Carga de Lavagem 11	Valor de <i>b</i> 12
1	115	120	25	7	8,6	4,5	7,2	10,07	5,61	252,4	Sem carga de lavagem	1,039
2	115	115	0	2,5	10,2	5,3	26,4	13,62	8,94	284,7	Moderado Retardo	1,155
3	110	105	0	7	14,0	7,6	28,8	5,99	4,98	210,3	Forte carga de lavagem	0,169
4	159	129	49	4	8,6	3,2	4,8	14,76	7,25	156,7	Moderado Retardo	1,318
5	99	129	15	0,25	4,4	2,7	4,8	14,39	7,03	121,6	Moderado Retardo	1,282
6	141	141	21	0,1	3,0	1,3	4,8	15,23	7,03	162,7	Fraca carga de lavagem	0,904
7	285	275	20	9	15,2	3,2	19,2	30,92	7,54	229,3	Moderada carga de lavagem	0,563
8	360	303	30	6	38,4	6,4	16,8	20,72	6,74	669,4	Moderada carga de lavagem	0,506
9	186	216	5	0,5	15,2	4,9	52,8	12,95	8,18	127,7	Moderado Retardo	1,378
10	93	102	0	0,8	3,2	2,1	12,0	4,00	3,45	326,4	Moderado Retardo	1,742

11	147	165	5	0,1	6,6	2,7	12,0	6,12	3,45	241,8	Moderado Retardo	1,971
12	490	760	20	5	20,2	2,5	12,0	60,49	5,78	536,4	Moderada carga de lavagem	0,793
13	415	390	35	0,5	9,6	1,4	7,2	29,49	7,50	563,2	Moderada carga de lavagem	0,558
14	560	820	0	0,5	39,2	4,2	57,6	113,40	15,17	204,6	Moderada carga de lavagem	0,490
15	755	840	25	2	60,8	4,8	100,8	80,38	20,66	627,8	Moderada carga de lavagem	0,731
16	65	120	15	1	4,4	4,1	14,4	7,35	5,25	791,8	Moderado Retardo	2,424
17	130	145	30	2	12,0	5,5	60,0	13,81	10,10	741,9	Moderado Retardo	1,776
18	45	150	10	2	5,8	7,7	21,6	15,99	8,38	917,4	Sem carga de lavagem	1,141
19	75	110	65	1,5	3,2	2,6	12,0	7,67	7,39	1121,4	Sem carga de lavagem	1,104
20	250	315	40	2	7,2	1,7	4,8	27,64	6,27	968,4	Sem carga de lavagem	1,024
21	720	780	105	0,1	53,4	4,5	55,2	85,41	9,25	707,5	Sem carga de lavagem	1,046
22	10	115	5	9	3,6	21,6	28,8	11,54	9,31	570,8	Moderado Retardo	1,190

23	185	175	10	0,2	3,2	1,0	9,6	16,05	7,48	554,6	Fraca carga de lavagem	0,99
24	20	170	15	0,1	1,2	3,6	4,8	14,41	6,27	530,3	Fraca carga de lavagem	0,911
25	340	245	120	9	15,6	2,8	12,0	35,22	9,25	705,1	Fraca carga de lavagem	0,877
26	180	475	20	8	27,0	9,0	62,4	50,26	10,02	591,8	Moderado Retardo	1,754
27	65	85	15	2,5	10,0	9,2	40,8	4,41	6,71	140,0	Moderado Retardo	1,498
28	320	405	0	2	45,6	8,6	84,0	40,04	21,75	137,1	Moderada carga de lavagem	0,816

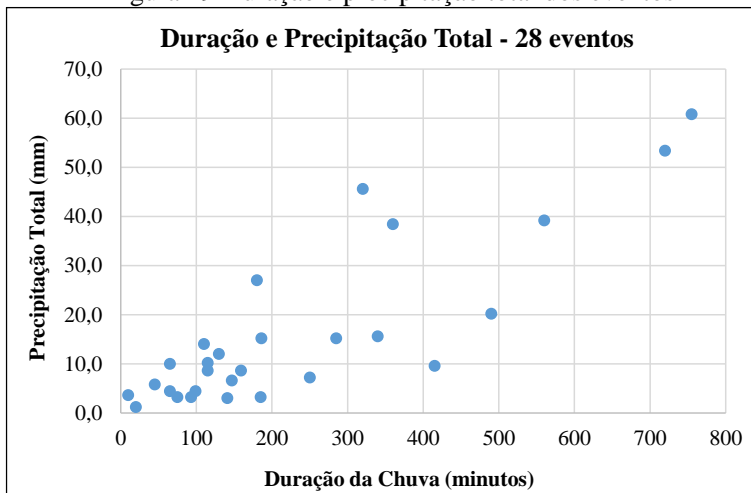
(1) Tempo de precipitação; (2) Tempo de escoamento; (3) Tempo de início da vazão após início da precipitação; (4) dias de seca antecedentes; (5) Precipitação Total; (6) Intensidade média; (7) Intensidade máxima em 5 minutos; (8) Volume acumulado; (9) Vazão máxima; (10) Concentração média do Evento; (11) Ocorrência da carga de lavagem; (12) Intensidade da carga de lavagem através do valor de b .

5.1 Avaliação do fenômeno da carga de lavagem

5.1.1 Caracterização da precipitação

O evento que teve a maior precipitação total foi o evento 15, com 60,8 milímetros e a menor precipitação total foi no evento 24 com 1,2 milímetros. A Figura 19 apresenta uma visão geral do tempo de precipitação e da precipitação total de todos os eventos deste estudo

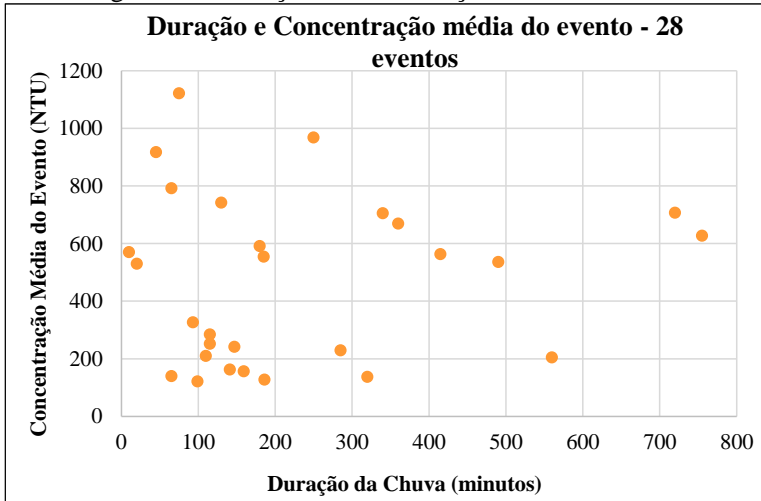
Figura 19 Duração e precipitação total dos eventos



5.1.2 Caracterização da Concentração média do evento

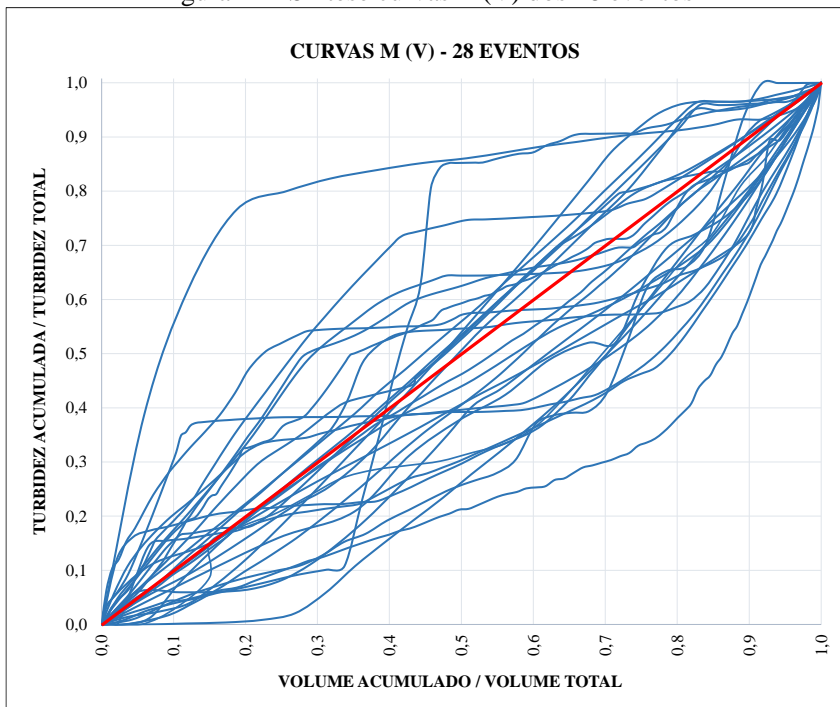
O evento que teve a maior concentração média do evento foi o evento 19, que apresentou 1121,4 NTU e a menor concentração média do evento foi no evento 5 com 121,6 NTU. A Figura 20 apresenta uma visão geral da concentração média de todos os eventos deste estudo

Figura 20 - Duração e Concentração média do evento



5.1.3 Síntese Curvas M (V)

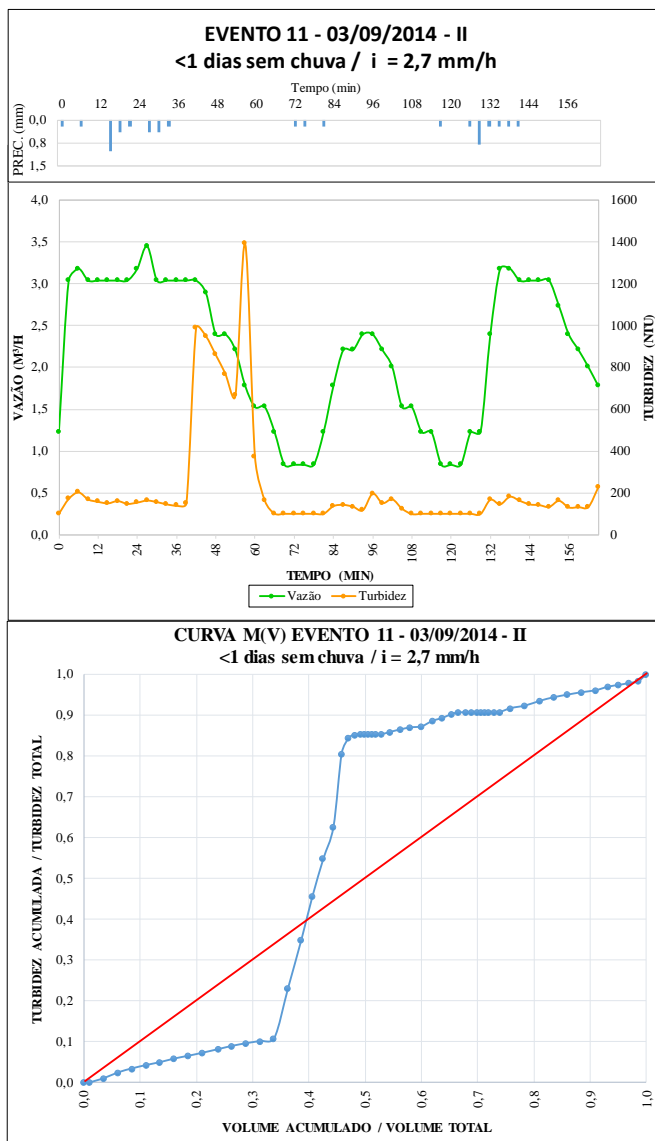
A Figura 21 traz a plotagem de todas as curvas M(V) deste estudo. Pode-se notar que as curvas apresentaram formas bastante variadas, não seguindo um padrão reconhecível visualmente para os eventos na região. A grande variabilidade da precipitação pode ser uma das causas deste comportamento. Todos os gráficos dos hidrogramas, polutogramas e curva M(V) para os 28 eventos são apresentados individualmente nos anexos.

Figura 21 - Síntese curvas $M(V)$ dos 28 eventos

Diversas curvas apresentaram mudanças bruscas de concavidade, comprovando que a distribuição concentração de turbidez em relação ao volume escoado ao longo do evento não apresenta um padrão linear, mas sim, em diversos casos observou-se dinâmicas opostas, ou seja, com aumento da vazão ocorre redução da carga de turbidez.

No caso mais pronunciado, o evento 11, detalhado na Figura 22, a forte mudança de concavidade da curva pode ser entendida como uma contribuição externa ao escoamento superficial, alterando completamente a dinâmica da distribuição da carga de turbidez para este evento.

Figura 22 – Hietograma, hidrograma, polutograma e curva M(V) do Evento 11



No entanto, os diversos eventos em que houve mudança de concavidade com menor intensidade, tal tendência ocorre devido ao transporte da carga de turbidez irregular ao longo dos eventos. Em diversos eventos a turbidez variou de acordo com a vazão. Quando a vazão é reduzida, é observado um aumento da concentração de turbidez, quando houve maior descarga do escoamento superficial, observou-se uma menor concentração de turbidez.

5.1.4 Análise da intensidade da carga de lavagem

A distribuição dos eventos nas zonas de intensidade do valor b no momento que 30% do volume já foi transportado é resumida na Tabela 9

Tabela 9 - Distribuição dos eventos nas 6 zonas de intensidade conforme o valor b

Carga de lavagem para turbidez	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
28 eventos	1	7	4	6	10	0
	3,5 %	25,0 %	14,2 %	21,4 %	35,7 %	0 %
Zona 1: Forte carga de lavagem; Zona 2: Moderada carga de lavagem; Zona 3: Fraca carga de lavagem; Zona 4: Sem carga de lavagem; Zona 5: Moderado Retardo da descarga de turbidez; Zona 6: Forte Retardo da descarga de turbidez						

Apenas em um caso foi constatado a carga de lavagem com forte intensidade, totalizado 3,5% por eventos estudados. Para o evento em questão, nos primeiros 30% do volume escoado, foi transportado 82,3% da carga total de turbidez para este evento.

A zona dominante em que se encontram as curva $M(V)$ é a zona 5 (moderado atraso na descarga do parâmetro turbidez), onde foram enquadrados 40,7% dos eventos. Ou seja, na maioria dos eventos, a maior carga de turbidez não está presente na parte inicial do escoamento. A Tabela 10 apresenta a porcentagem da carga de turbidez que foi transportado em 30% do volume do escoamento superficial para os 28 eventos avaliados

Tabela 10 - Porcentagem da carga de Turbidez transportada em 30 % do volume

Evento	Porcentagem da carga de Turbidez (30% do Volume)
1	29%
2	25%
3	82%
4	21%
5	22%
6	34%
7	52%
8	54%
9	20%
10	13%
11	10%
12	38%
13	51%
14	56%
15	42%
16	6%
17	11%
18	25%
19	26%
20	30%
21	29%
22	25%
23	30%
24	35%
25	35%
26	12%
27	21%

28	38%
----	-----

5.2 Correlação do fenômeno da carga de lavagem com os dados quantitativos dos eventos

A forma das curvas $M(V)$ é diretamente descritas pelo valor de b , assim, apesar da complexidade dos fenômenos envolvidos, são investigados os fatores que possam ter influência nos menores valores de b , que correspondem à ocorrência da carga de lavagem.

Além das características apresentada na Tabela 8, foi possível perceber que os eventos se enquadraram em dois padrões de comportamentos distintos em relação ao momento da vazão de pico:

- Vazão de pico inicial

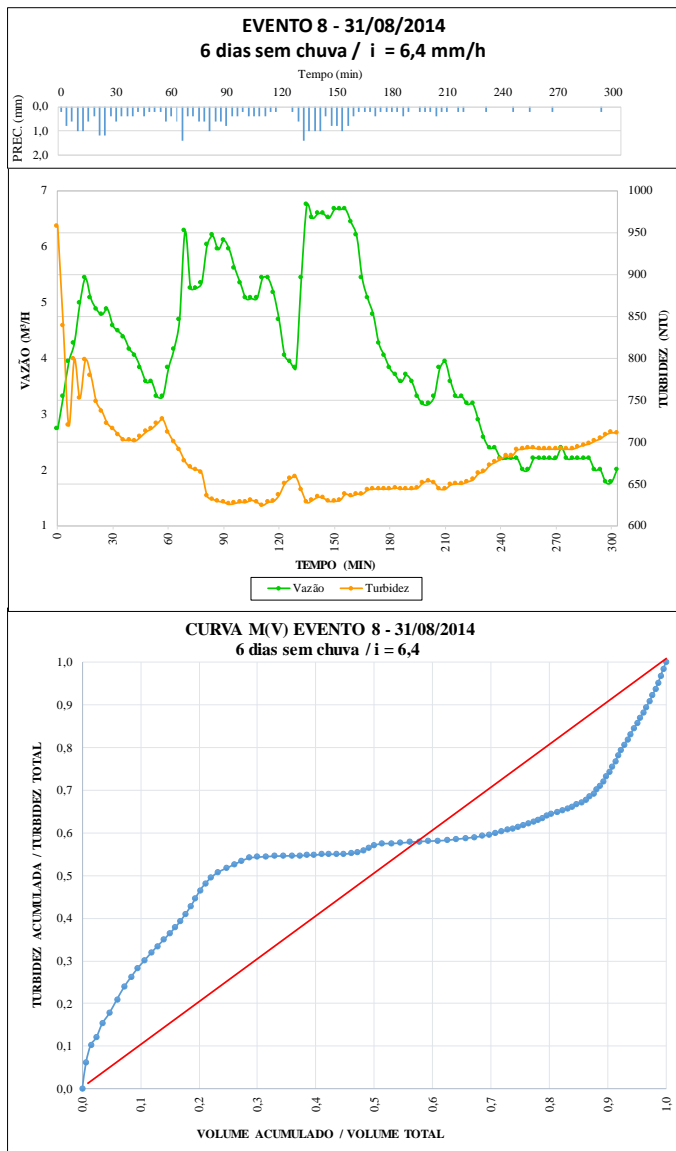
13 eventos apresentaram um único pico de vazão na parte inicial do escoamento, e posteriormente a vazão foi reduzindo gradativamente. Os eventos com essa características foram: 2; 3; 9; 10; 16; 17; 18; 19; 22; 23; 24; 26 e 27. A grande maioria desses casos (salvo o evento 26) foram eventos de baixa a moderada precipitação (menor que 15mm).

Além disso, apenas o evento 3 apresentou o fenômeno da carga de lavagem com alta intensidade. O restante dos casos apresentaram tendências de diluição da carga de turbidez na parte inicial do evento, apresentando curvas $M(V)$ próximas ou abaixo da reta bissetriz. Essa característica pode ser entendida como uma dinâmica oposta da variação de turbidez e vazão, uma vez que na parte inicial do escoamento, onde ocorre o pico de vazão, foi constatado menor porção da carga de turbidez em relação as partes posteriores do evento de chuva, onde ocorre a redução gradativa da vazão.

- Múltiplas Vazões de pico

15 eventos apresentaram múltiplos picos de vazão. Foram eles os eventos número: 1; 4; 5; 6; 7; 8; 11; 12; 13; 14; 15; 20; 21; 25; 28. Nessas situações, estão contemplados os eventos com maiores precipitações total, assim como alguns casos de baixa/moderada precipitação total. Além disso, é observado, novamente, dinâmica oposta da carga de turbidez e da vazão de escoamento. Em grande parte dos eventos foi verificado que com o aumento da vazão, ocorre uma redução nos valores de turbidez, indicando assim uma diluição da concentração de turbidez nos momento de pico da vazão no escoamento. Apesar dos casos não serem semelhantes em termos de valores absolutos de vazão e turbidez, eles apresentam o mesmo padrão de distribuição ao longo do evento. A Figura 23 ilustra essa característica.

Figura 23 – Hietograma, hidrogramas, polutograma e curva M(V) do Evento 8



Em relação a carga de lavagem, os eventos com diversos picos de vazão são a maior parcela dos casos que apresentaram o fenômeno. Em 7 desses eventos, foi registrado a carga de lavagem com intensidade moderada, e dois deles o fenômeno com fraca intensidade.

5.2.1 Análise estatística da correlação da carga de lavagem com os dados quantitativos dos eventos

A Tabela 11 apresenta os resultados dos testes estatísticos. Os resultados obtidos com a correlação de Spearmann e com a Pearson distinguiram razoavelmente, o que indica a não predominância de correlação linear entre as variáveis. Dentre os valores apresentados, destaca-se a correlação significativa e positiva entre o tempo de precipitação, tempo de escoamento e o volume acumulado em relação a intensidade da carga de lavagem quando 30% do volume foi descarregado. Os resultados sinalizam que eventos de maiores magnitudes em termos de volume escoado, e mais longos em relação ao tempo de precipitação e tempo de escoamento tendem a apresentar nos primeiros 30% do volume de escoamento uma maior carga turbidez em relação ao restante do evento.

Tabela 11 - Correlação de Pearson e Spearmann entre a carga de lavagem (em 30% do volume) e os parâmetros quantitativos do evento

Parâmetros	Paramétrico		Não Paramétrico	
	Pearson r	p-level	Spearmann R	p-level
Tempo de precipitação (min)	0,3978	0,0360	0,5180	0,0047
Tempo de escoamento (min)	0,3138	0,1040	0,4509	0,0160
Tempo de início do escoamento (min)	-0,0217	0,9130	0,0799	0,6860
Dias antecedentes sem chuva	0,2772	0,1530	0,1628	0,4077
Precipitação total (mm)	0,3386	0,0780	0,3703	0,0524
Intensidade média (mm/h)	-0,0246	0,9010	-0,1137	0,5645
Intensidade máxima em 5 min. (mm/h)	0,0539	0,7850	0,0026	0,9895
Volume acumulado total (m3)	0,3216	0,0950	0,5351	0,0033
Vazão máxima (m3/h)	0,1945	0,3210	0,1480	0,4523

CME	-0,1488	0,4500	-0,0597	0,7627
------------	---------	--------	---------	--------

Para uma análise e visualização mais detalhada, alguns dos parâmetros comumente sugeridos como possíveis influenciadores da carga de lavagem foram relacionados graficamente com o fator de intensidade b .

5.2.2 Intensidade média e máxima em 5 minutos

Um dos fatores mais comuns analisados em estudos da carga de lavagem é a intensidade média e máxima do evento de chuva. Imagina-se que chuvas mais intensas tenham maior facilidade para fazer o arraste de sedimentos (fator gerador da turbidez) contidos na superfície da área de drenagem. Analisando mais detalhadamente o evento 3 na Figura 24, único que apresentou forte carga de lavagem, verifica-se no momento inicial do escoamento a maior intensidade de precipitação, levando a suspeitar que a intensidade (média 7,6 mm/h e máxima em 5 min de 28mm/h) pode ter sido o fator influente para o fenômeno acontecer. No entanto, o evento 26 (Figura 25), que teve intensidade de média 9,0 mm/h e máxima de 62,4 mm/h (valores superiores ao observados no evento 3) e teve na parte inicial do evento precipitação com maior intensidade (assim como no evento 3) apresentou, em contra partida, distribuição da carga de turbidez ao longo do evento completamente diferente. Assim, as curvas $M(V)$ apresentarem características apostas. Casos semelhantes a esse aconteceram nos eventos 17, 18 e 26, todos esses não apresentando também o fenômeno da carga de lavagem.

Figura 24 – Hietograma, hidrogramas, polutograma e curva M(V) do Evento 3

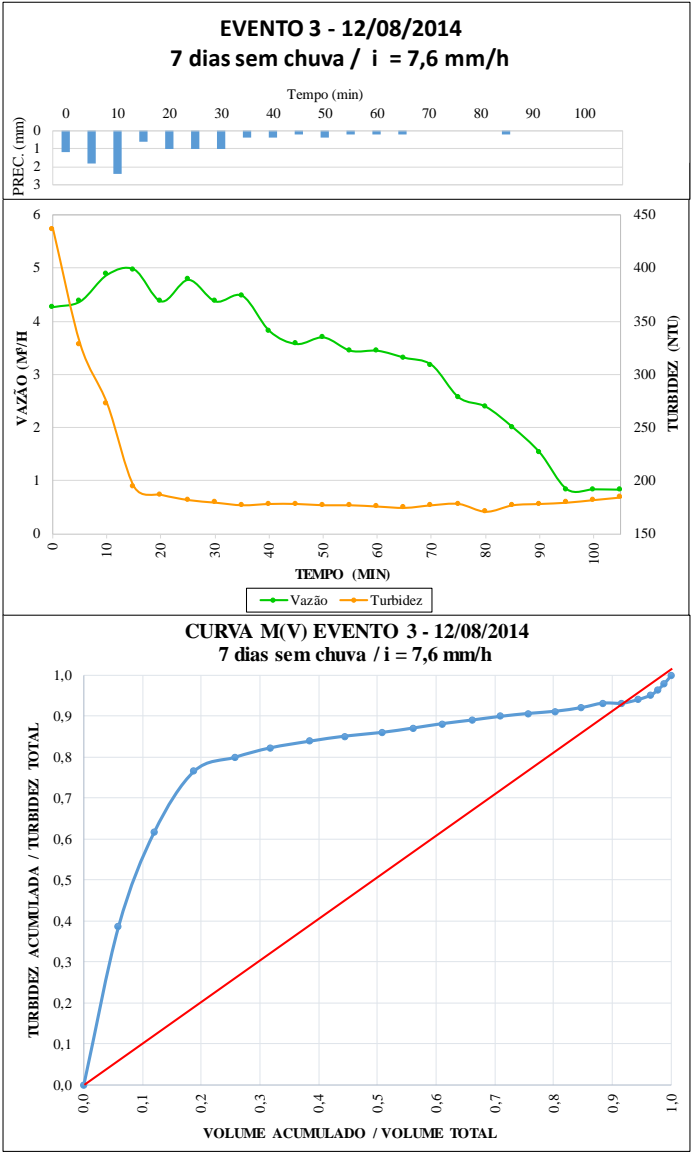
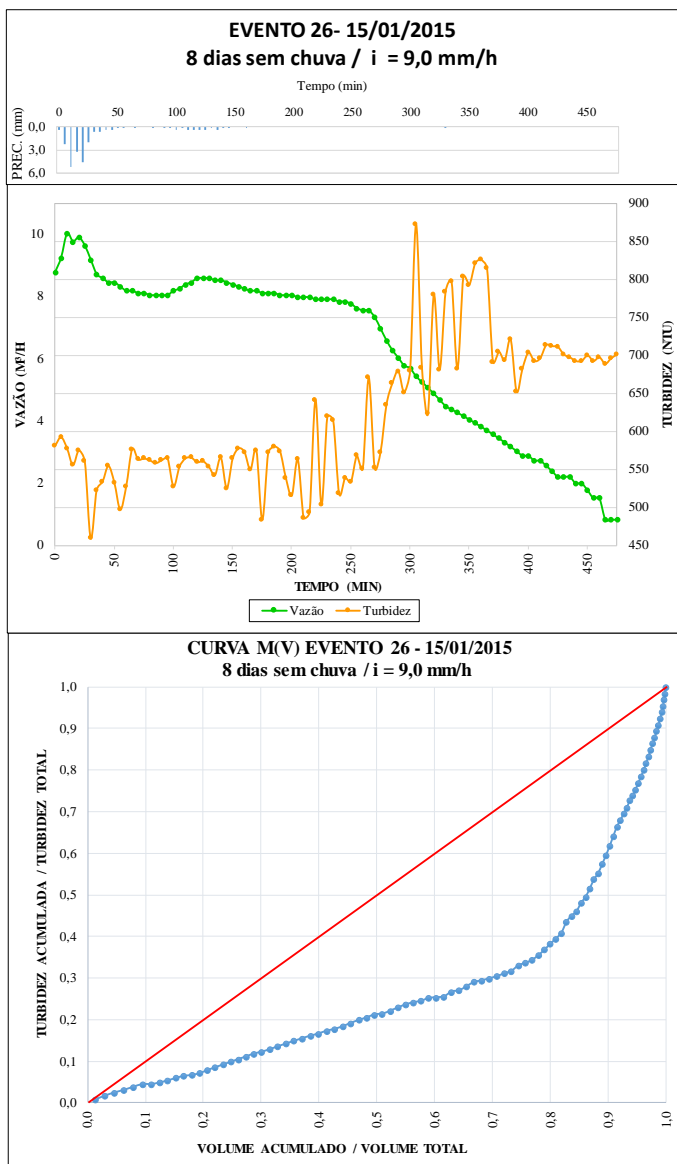


Figura 25 - Hietograma, hidrogramas, polutograma e curva M(V) do Evento 26



As Figura 26 e Figura 27, apresentam, respectivamente, todos os 28 eventos conforme a intensidade média e intensidade máxima em 5 minutos, em relação aos valores de b . Como é possível visualizar através dos gráficos, para este estudo, a intensidade de chuva não apresentou relação contundente para o fenômeno, uma vez que diversos eventos com valores muito próximo de intensidade apresentaram resultados opostos para a ocorrência da carga de lavagem.

Figura 26 - Comparação intensidade média com valor b

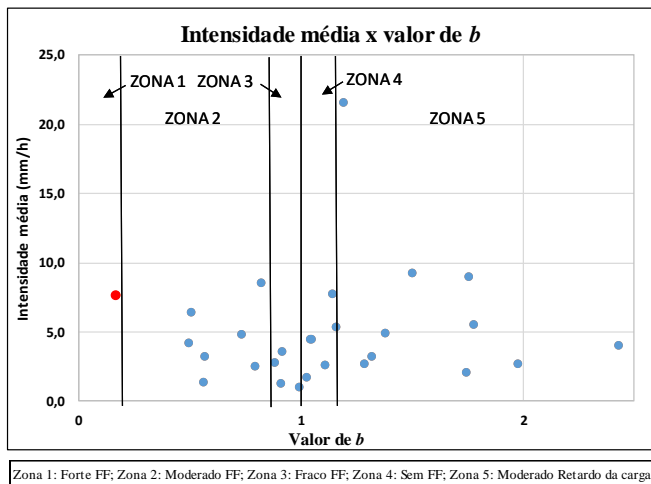
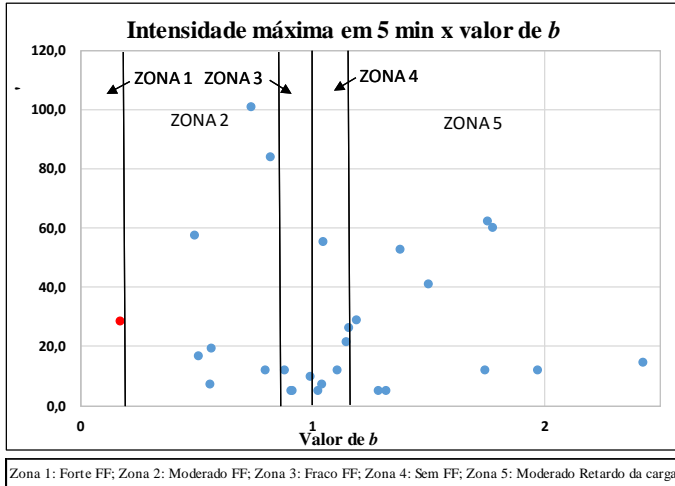
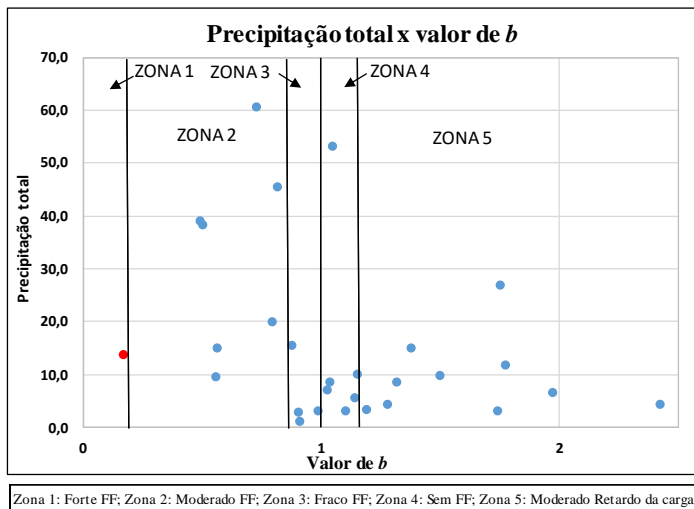


Figura 27 - Comparação intensidade máxima em 5 min com o valor de b



5.2.3 Precipitação total

A precipitação total é normalmente outro parâmetro analisado ao tentar compreender a carga de lavagem. Apesar do evento 3, único em que apresentou forte carga de lavagem (Zona 1) ter tido uma precipitação acumulada de 14,0 mm, (semelhante a diversos eventos das zonas 4 e 5), e a precipitação total não ter apresentado correlação significativa, segundo os testes estatísticos, ainda assim é possível perceber uma tendência para eventos de maiores precipitações serem mais susceptíveis a ocorrência da carga de lavagem. A Figura 28 apresenta a precipitação acumulada dos 28 eventos relacionado aos valores de b .

Figura 28 - Comparação da precipitação total com o valor de b 

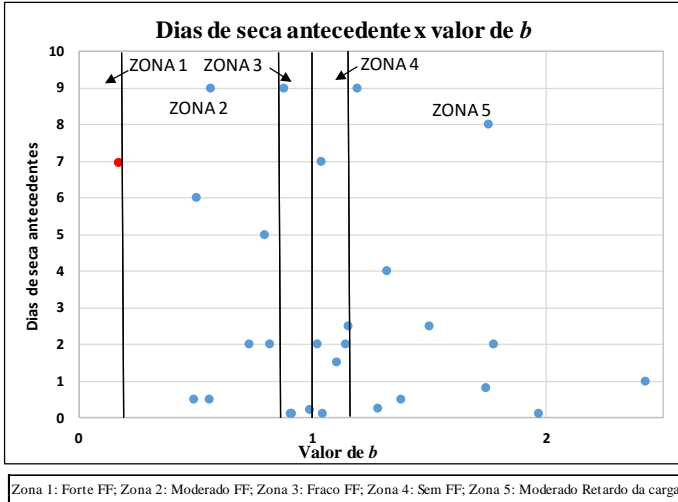
Observa-se que 72% dos casos em que a precipitação acumulada foi inferior a 15mm, o evento não apresentou carga de lavagem. Em contrapartida, 70% dos casos em que a precipitação acumulada foi superior a 15mm, o evento apresentou carga de lavagem moderada.

Assim, como a precipitação total está diretamente relacionada com o volume acumulado total (parâmetro com a maior correlação segundo os testes estatísticos), sugere-se novamente que eventos com maior magnitude possuem maior tendência a ocorrer o fenômeno da carga de lavagem.

5.2.4 Dias de seca antecedente

A Figura 29 apresenta os dias de seca antecedentes dos 28 eventos relacionado aos valores de b . Como é possível observar, os dias de seca antecedente não apresentaram tendências conclusivas com a intensidade da carga de lavagem

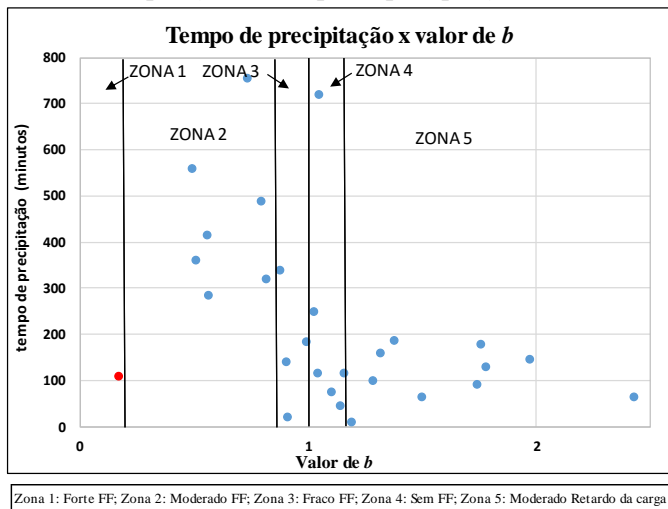
Figura 29 - Comparação dos dias de seca antecedente com o valor de b



5.2.5 Tempo de precipitação

Apesar do único evento que apresentou carga de lavagem com forte intensidade ter tido um tempo de precipitação semelhante à grande maioria dos eventos enquadrados nas zonas 4 e 5, o tempo de precipitação foi um dos parâmetro que apresentaram correlação com a intensidade da carga de lavagem através dos testes estatísticos. Ao analisar visualmente a Figura 30, percebe-se uma tendência dos eventos com maior tempo de precipitação apresentarem uma descarga maior da carga de turbidez nos primeiros 30% do volume escoado. Em contrapartida, eventos com tempo de precipitação menores tiveram características de diluição da carga de turbidez nos primeiros 30% do volume escoando.

Figura 30 - Comparação do tempo de precipitação com o valor de b

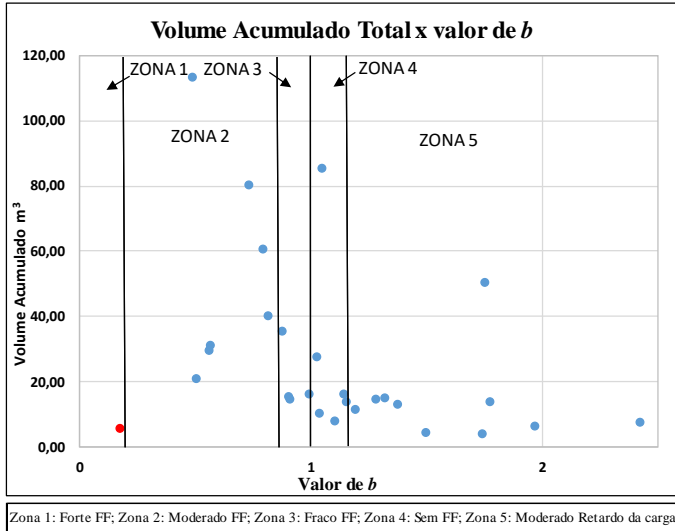


Dos eventos com um tempo de precipitação superior a 200 minutos, 72% deles apresentaram o fenômeno da carga de lavagem. Já os eventos mais curtos, com tempo de precipitação inferior a 200 minutos, 81% deles não apresentaram carga de lavagem.

5.2.6 Volume Acumulado

O volume acumulado foi o parâmetro que apresentou maior correlação com a intensidade da carga de lavagem através dos testes estatísticos. Apesar do único evento que apresentou o fenômeno com alta intensidade ter sido um evento com baixo volume acumulado, é possível visualizar pela Figura 31 claramente a tendência em eventos de maiores magnitudes a apresentarem carga de lavagem.

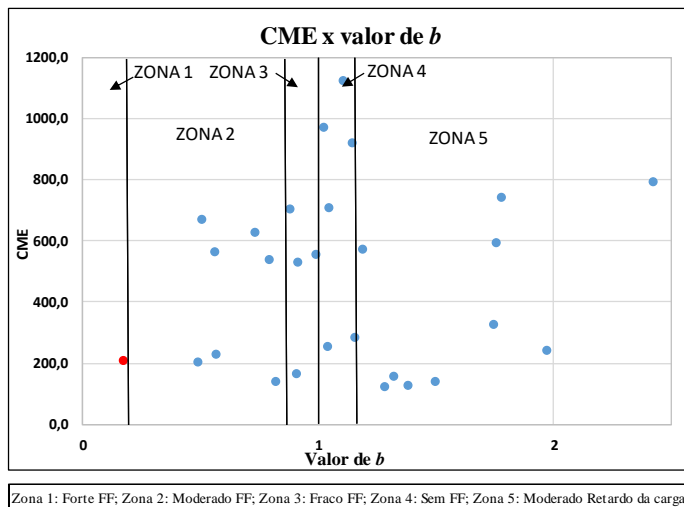
Figura 31 - Comparação do volume acumulado com o valor de b



Em 73% dos casos em que o volume acumulado foi superior a 20m^3 , o evento apresentou o fenômeno. Por outro lado, os eventos que apresentaram volume acumulado inferior a 20m^3 , 76% deles não apresentaram carga de lavagem.

5.2.7 Concentração média do evento (CME)

A Figura 32 apresenta a comparação da concentração média de cada evento em relação ao valor de b . Como é possível visualizar pelo gráfico, a concentração média do evento não apresentou qualquer relação com a intensidade da carga de lavagem.

Figura 32 - Comparação da CME com o valor de b 

5.2.8 Vazão Máxima

A Figura 33 ilustra a comparação entre a vazão máxima e o valor de b para os 28 eventos analisados. Como é possível observar, os três eventos com as maiores vazões de pico apresentaram o fenômeno. No entanto, todos esses casos (eventos 14, 15 e 28) tiveram a vazão máxima acontecendo na segunda parte do evento, momento que já havia sido escoado 30% do volume inicial, logo, fica claro que, apesar destes eventos ter apresentado carga de lavagem, a vazão de pico desses eventos não teve influência na maior descarga de turbidez na parte inicial do evento. A Figura 34 ilustra essa situação.

Figura 33 - Comparação da Vazão máxima com o valor de b

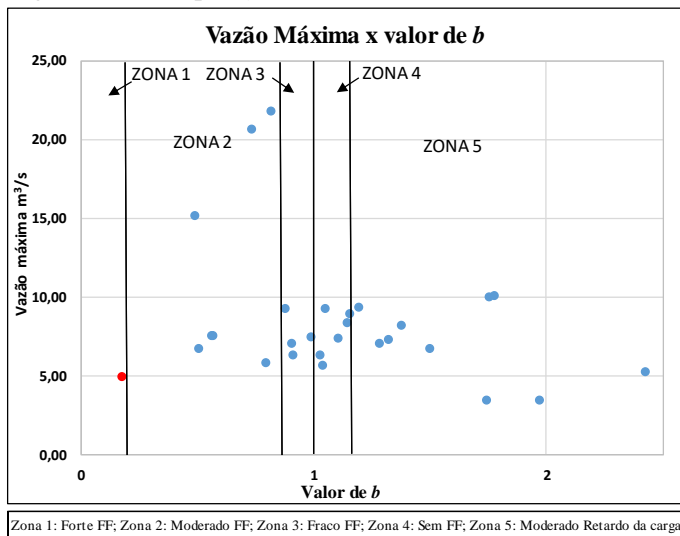
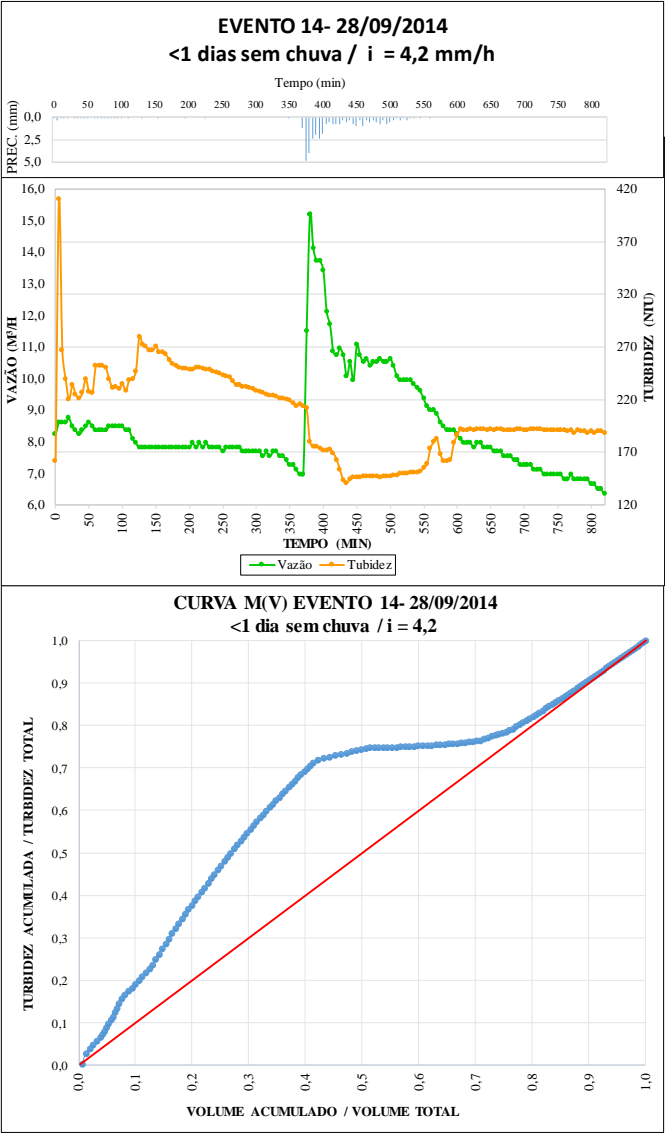


Figura 34 - Hietograma, hidrogramas, polutograma e curva M(V) do Evento 14



6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a ocorrência do fenômeno da carga de lavagem no escoamento superficial para um possível dimensionamento mais eficiente e econômico de estruturas compensatórias de drenagem urbana. O local das análises deste estudo foi a área contribuição de uma vala de infiltração, localizada na bacia hidrográfica do Rio Tavares, no Distrito do Campeche, Florianópolis.

Através da análise das 28 curvas $M(V)$, ficou claro que os eventos apresentaram curvas bastante distintas ao longo do período de análise, não apresentando um padrão de evento para a região, possivelmente devido à grande variabilidade da precipitação nos eventos de chuva da região. Observou-se que ocorrem mudanças bruscas de concavidade da curva $M(V)$ em muitos eventos, levando a entender que a distribuição da carga de turbidez e o volume escoado apresentam dinâmicas distintas. Esta conclusão ficou evidente ao se analisar os hidrogramas e polutogramas, nos quais, de maneira geral, nos momentos que houveram maiores vazões de escoamento, os valores de turbidez eram menores em relação ao evento. Em contrapartida, com o decréscimo da vazão, os valores de turbidez se mostraram mais elevados.

A maior parte dos eventos apresentou diluição da carga de turbidez na parcela inicial do evento. Em 35,7% dos casos, estiveram na Zona 5, que representa moderado retardo da carga de turbidez e 21,5% do eventos estiveram na Zona 4, não apresentando a carga de lavagem. Já nos casos em que ocorreu a carga de lavagem, 14,2% estiveram na Zona 3, de fraca intensidade e 25% na Zona 2, de moderada intensidade. Em relação a carga de lavagem com forte intensidade, apenas o evento 3 apresentou essa característica. Não foi possível estabelecer qualquer relação da ocorrência da forte carga de lavagem com as características do evento. Esse resultado é similar com o que vem sendo encontrado em outros estudo em diversas bacias hidrográficas ao redor do mundo, levando-se a acreditar que tal fenômeno com alta intensidade não é algo comum no escoamento superficial urbano, mas sim tendo ocorrência esporádica e sem claras correlações até o momento.

No entanto, buscou-se encontrar correlações entre as principais características dos eventos de chuva e a ocorrência ou não da carga de lavagem. Em relação a intensidade média e máxima em 5 minutos, através da análise estatística e observação dos gráficos, não foi possível indicar que os eventos

de maiores intensidade ou o momento de máxima intensidade foi influenciador para ocorrência da carga de lavagem ou mesmo um nítido aumento na descarga de turbidez.

Os dias de seca antecedentes e a concentração média do evento também não puderam ser relacionados com a carga de lavagem. Em ambos os casos, diversos eventos com valores parecidos desses parâmetros tiveram diferentes resultados em relação ao fenômeno, conclusão essa, confirmada através dos testes estatísticos. Entende-se que a disponibilidade de sedimentos para ser transportados na superfície da área de drenagem é bastante variável e irregular, uma vez que eventos com os mesmos dias antecedentes de seca, apresentaram concentrações médias bastante diferentes.

O tempo de precipitação e o tempo de escoamento, através dos testes estatísticos, apresentaram correlação positiva significativas com a intensidade da carga de lavagem, possibilitando concluir que eventos mais longos apresentam maior possibilidade do fenômeno.

O volume acumulado, com base nos testes estatísticos, foi o parâmetro que apresentou maior correlação com a intensidade da carga de lavagem nos primeiros 30% do volume de escoamento. Em 73% dos casos em que o volume acumulado foi superior a 20m^3 , os eventos apresentaram carga de lavagem. Por outro lado, os eventos que apresentaram volume acumulado inferior a 20m^3 , 76% deles não apresentaram o fenômeno. Assim, conclui-se que a carga de lavagem é mais provável de acontecer em eventos de maior magnitude. De fato este resultado é bastante importante, uma vez que o volume total de um evento de chuva é um dos parâmetros mais importantes no dimensionamento de técnicas compensatórias de drenagem urbana, uma vez que, muitas vezes o espaço disponível para uma nova estrutura pode ser um dos empecilhos para a implementação de tais medidas estruturais.

Este resultado vai ao encontro as conclusões de Deletic (1998), que avaliou em 23 eventos de chuva o fenômeno da carga de lavagem para o parâmetro sólidos suspensos totais, realizada em Belgrade, Yugoslavia. O autor, assim como neste trabalho, através da avaliação estatística, encontrou o parâmetro volume acumulado como a maior correlação(positiva) significativa para a ocorrência do fenômeno.

Em síntese, através desse trabalho, pode-se concluir que na área de contribuição da vala de infiltração, localizada no Distrito do Campeche, Florianópolis os eventos de chuva mais longos e de maiores magnitude possuem tendência a apresentar o carga de lavagem. Uma possível explicação é que tais eventos possuem maior energia para remover a maior parte da carga de

turbidez, provendo menores níveis de carga de turbidez na parte final do evento.

Além disso, ressalta-se as variações da ocorrência e intensidade da carga de lavagem e as formas das curvas $M(V)$ não podem ser calculadas usando padrões e características universais de clima, características da bacia hidrográfica ou de eventos de chuva, mas sim, é sugerido que a natureza do fenômeno é complexa e específica de cada local.

Por fim, ressalta-se a necessidade de estudos mais aprofundados de série de dados qualitativos para esclarecer cada vez mais a dinâmica do transporte de poluentes no escoamento urbano a fim de chegar-se futuramente a projetar estruturas de tratamento, retenção, infiltração mais eficientes, economicamente viáveis e customizadas para as bacias hidrográficas. Ademais, com maiores esclarecimentos na área, modelos mais sofisticados e efetivos podem ser desenvolvidos para auxiliar na gestão e controle das águas urbanas. Em relação a carga de lavagem, estudos futuros poderiam ser focados em entender qual seria a magnitude do volume necessário para carregar a maior parte da carga poluidora em uma área de drenagem.

7 REFERÊNCIAS

BAPTISTA, M. B; BARRAUD, S; NASCIMENTO, N. O. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 1 Ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.

BATRONEY, Thomas; WADZUK, Bridget M.; TRAVER, Robert G. Parking deck's first flush. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, n. 2, p. 123-128, 2009..

BERTRAND-KRAJEWSKI, Jean-Luc; CHEBBO, Ghassan; SAGET, Agnes. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. **Water research**, v. 32, n. 8, p. 2341-2356, 1998.

BUTLER, D.; DAVIES, J. W. **Urban Drainage**, E & FN Spon publishing, London, United Kingdom. ISBN 0-419-22340-1, 2000.

CANHOLI, A.,P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. 2. Ed. Oficina de textos, 2015

CARDOSO, R.S; FUKUSHIRO, I.A; ZILLI, A.L; NIL, T.Y; ESPERANDIO, P; LANGONI, R.A; HIGUCHI, F.R. **Poluição Urbana Difusa**. São Paulo, Novembro, 2003.

CARVALHO, KS de; PARANHOS, R. M.; PAIVA, JBD de. Limitações ao uso da relação entre turbidez e concentração de sedimento em suspensão em duas pequenas bacias em Santa Maria, RS. In: **XXI Congresso Latino-americano de Hidráulica. Anais. São Pedro, SP**. 2004.

COMITÉ DE ÁGUAS PLUVIAIS DE VICTÓRIA. **Urban Stormwater: Best Practice Environmental Management Guidelines**. 1999.

COSTA, Maria Elisa Leite. **Monitoramento e modelagem de águas de drenagem urbana na bacia do lago Paranoá**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) -Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CRUZ, Marcus Aurélio Soares et al. Valorização da água no meio urbano: um desafio possível. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, v. 14, 2001.

CRUZ, M. A. S; TUCCI, C. E. M; DA SILVEIRA, A. L. L Controle do escoamento em um lote urbano. **Revista brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 4, p. 19-31. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1998.

DELETIC, Ana. The first flush load of urban surface runoff. **Water research**, v. 32, n. 8, p. 2462-2470, 1998

DENG, Zhi-Qiang; DE LIMA, João LMP; SINGH, Vijay P. Fractional kinetic model for first flush of stormwater pollutants. **Journal of environmental engineering**, v. 131, n. 2, p. 232-241, 2005.

FLETCHER, Tim D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525-542, 2015.

FLETCHER, Tim D.; DELETIC, Ana. Statistical observations of a storm-water monitoring programme: lessons for the estimation of pollutant loads. **NOVATECH 2007**, 2007.

FLORIANÓPOLIS. IPUF. **Plano Diretor Participativo da Cidade: Lei-tura da Cidade** (vol. 1) 2008. Florianópolis: Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis, 2008.

FLORIANÓPOLIS – Prefeitura Municipal de Florianópolis, Secretaria Municipal de Habitação e Saneamento. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico do município de Florianópolis**. Versão Final, 2011

LACOUR, Céline; JOANNIS, Claude; CHEBBO, Ghassan. Assessment of annual pollutant loads in combined sewers from continuous turbidity measurements: Sensitivity to calibration data. **Water Research**, v. 43, n. 8, p. 2179-2190, 2009.

LEE, J. H. et al. First flush analysis of urban storm runoff. **Science of the Total Environment**, v. 293, n. 1, p. 163-175, 2002.

LI, Li-Qing et al. First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 19, n. 3, p. 295-299, 2007.

LUO, Hongbing et al. Pollution characteristics of urban surface runoff in a street community. **Sustainable Environment Research**, v. 22, n. 1, p. 61-68, 2012.

MARTINS, José Rodolfo Scarati. Gestão da drenagem urbana: só tecnologia será suficiente?. **Artigo Científico**, v. 1, p. 11, 2012..

MCCARTHY, D. T. A traditional first flush assessment of E. coli in urban stormwater runoff. **Water Science and Technology**, v. 60, n. 11, p. 2749-2757, 2009.

MÉTADIER, M.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J. L. Assessing dry weather flow contribution in TSS and COD storm events loads in combined sewer systems. **Water Science and Technology**, v. 63, n. 12, p. 2983-2991, 2011.)

MÉTADIER, M.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L. The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes. **Water research**, v. 46, n. 20, p. 6836-6856, 2012.

MOURAD, M.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L. A method for automatic validation of long time series of data in urban hydrology. **Water Science and Technology**, v. 45, n. 4-5, p. 263-270, 2002.

MOURAD, M.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L.; CHEBBO, Ghassan. Calibration and validation of multiple regression models for stormwater quality prediction: data partitioning, effect of dataset size and characteristics. **Water Science and Technology**, v. 52, n. 3, p. 45-52, 2005.

MROWIEC, MACIEJ; KAMIZELA, Tomasz; KOWALCZYK, Mariusz. Occurrence of first flush phenomenon in drainage system of Częstochowa. **Environment Protection Engineering**, v. 35, n. 2, p. 73-80, 2009.

PACHECO, Elisa F. **Estudo dos impactos da drenagem urbana nos recursos hídricos do distrito do Campeche**. 2012. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

PACHECO, E. F. **Avaliação quali-quantitativa do desempenho de uma vala de infiltração de águas pluviais implantada em Florianópolis**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

PACKMAN, James; COMINGS, Karen; BOOTH, Derek. Using turbidity to determine total suspended solids in urbanizing streams in the Puget Lowlands. 1999.

PINTO, L. C. A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigatória da impermeabilização do solo urbano**. . Dissertação (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 2011

POLETO, Cristiano. **Fontes potenciais e qualidade dos sedimentos fluviais em suspensão em ambiente urbano**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

POMPÊO, C. A. Drenagem urbana sustentável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 1, p. 15-23, 2000.

SANSALONE, John J.; CRISTINA, Chad M. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds. **Journal of Environmental Engineering**, v. 130, n. 11, p. 1301-1314, 2004.

SARASWAT, Chitresh; KUMAR, Pankaj; MISHRA, Binaya Kumar. Assessment of stormwater runoff management practices and governance under climate change and urbanization: An analysis of Bangkok, Hanoi and Tokyo. **Environmental Science & Policy**, v. 64, p. 101-117, 2016.

Shamseldin, A.Y. (2011). First Flush Analysis in the Auckland Region. Preparado para Auckland UniServices Ltd para Auckland Regional Council. Auckland Council Technical Report, 2011

SPERLING, Marcos von. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. In: **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

StatSoft, Inc. (2007). STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. www.statsoft.com

TAEBI, Amir; DROSTE, Ronald L. First flush pollution load of urban stormwater runoff. **Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 3, n. 4, p. 301-309, 2004.

TEMPRANO, Javier et al. Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain. **Water SA**, v. 32, n. 1, p. 55-63, 2005.

TUCCI, Carlos EM. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, 2005.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem Urbana** 1. ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS. Cap 1 p. 15-36.1995 .

TUCCI, Carlos EM. Água no meio urbano. **Águas Doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação**, v. 2, p. 475-508, 1999.

TUCKER, Robert Smith et al. Urban stormwater: First flush analysis and treatment by an undersized constructed wetland. 2007.

URBONAS, Ben; STAHR, Peter. **Stormwater: best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management**. 1993.

WEIDMANN, Lawrence W. Stormwater methods and trends for “first flush” treatment in Georgia. 2005.

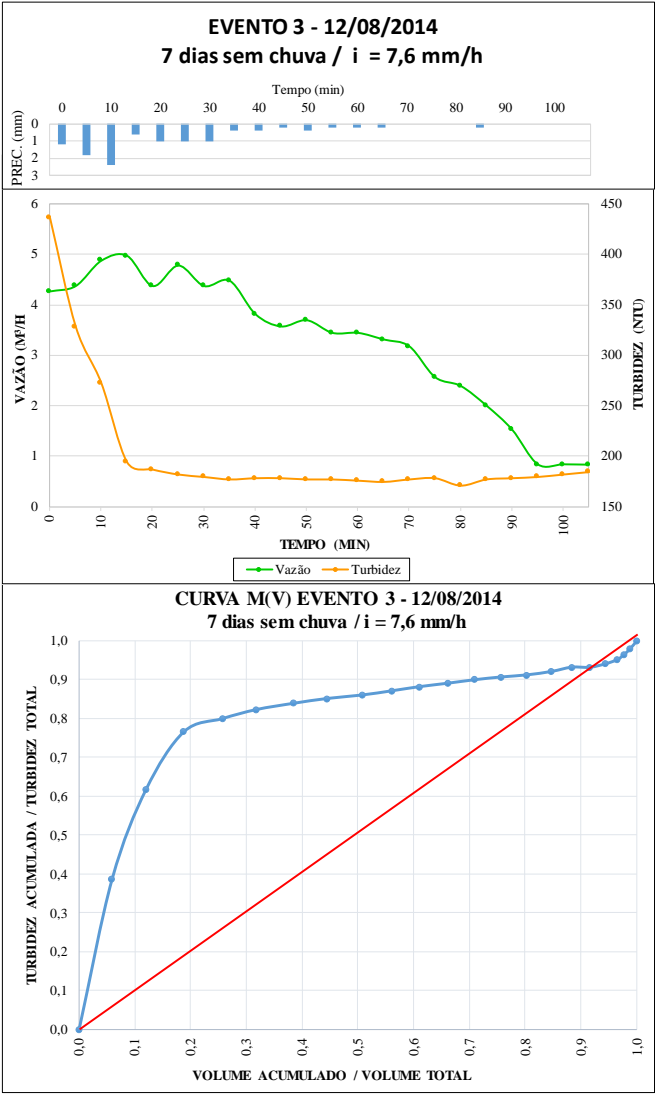
YAHYAPOUR, Soheil et al. Removal of total suspended solids and turbidity within experimental vegetated channel: optimization through response

surface methodology. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 8, n. 3, p. 260-269, 2014

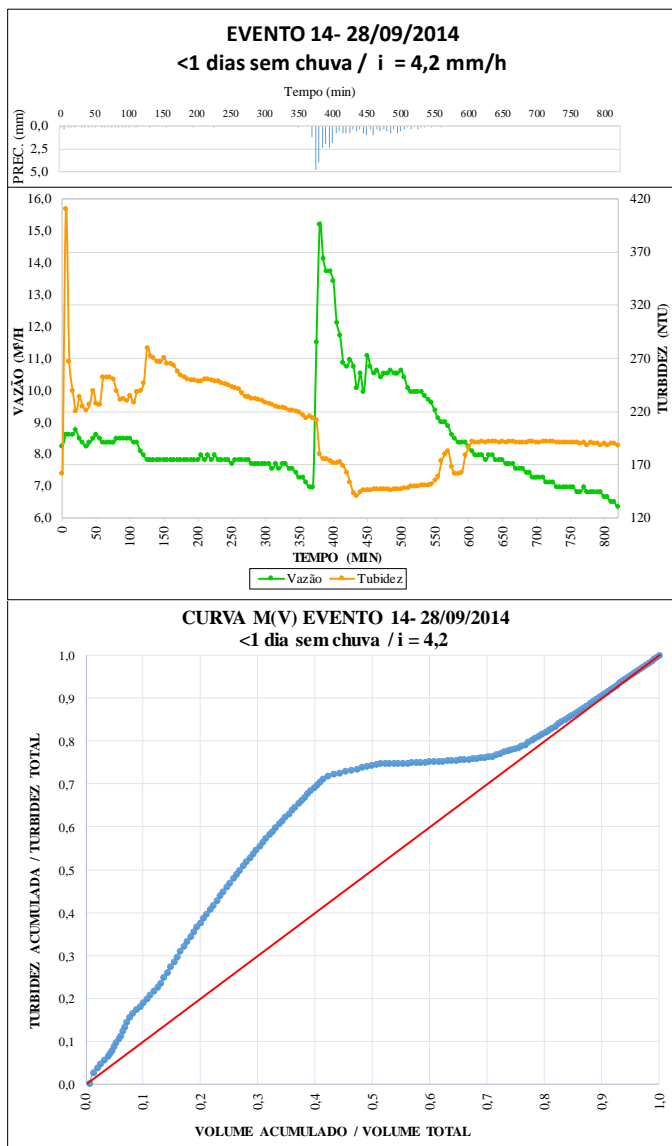
ZUBIAURRE BRITES, Ana Paula et al. Avaliação da carga difusa da drenagem pluvial urbana na bacia hidrográfica Cancela. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 23. ABES, 2005. p. 1-8.

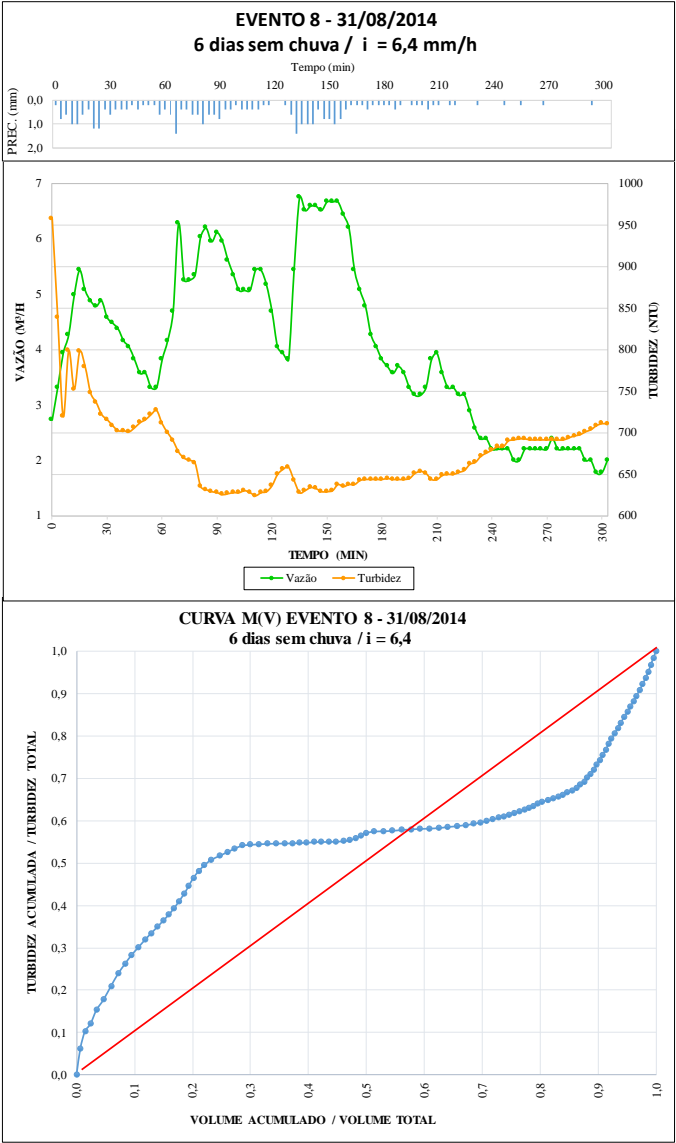
8 ANEXOS

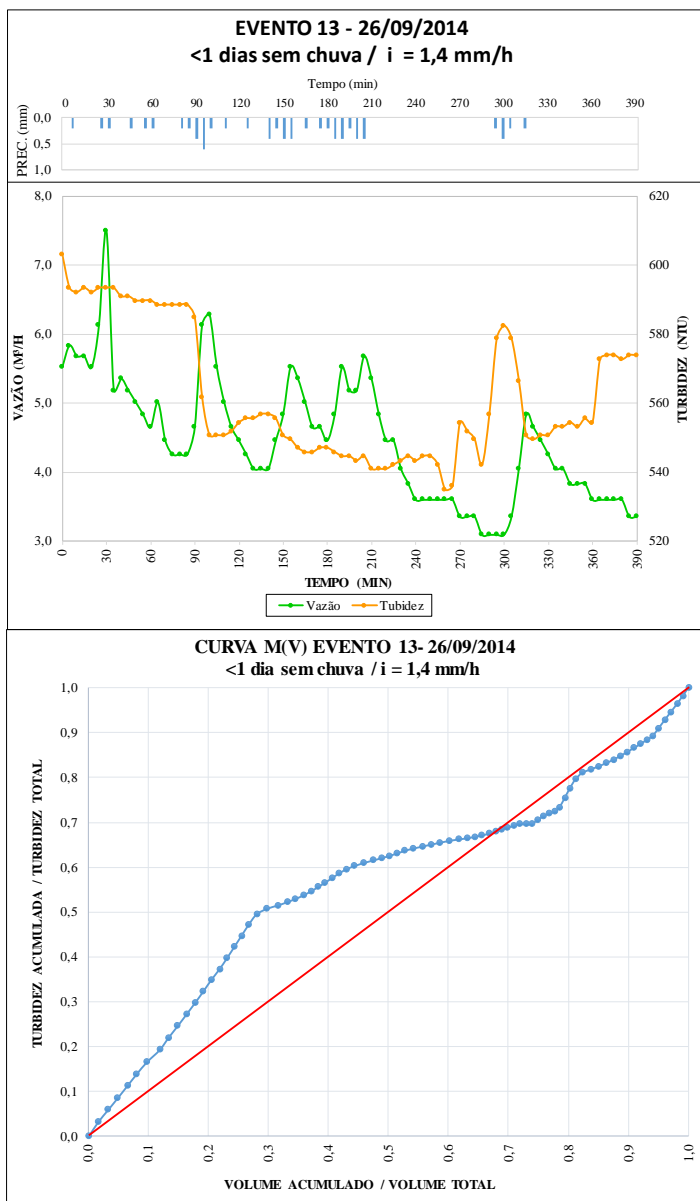
8.1 Forte carga de lavagem

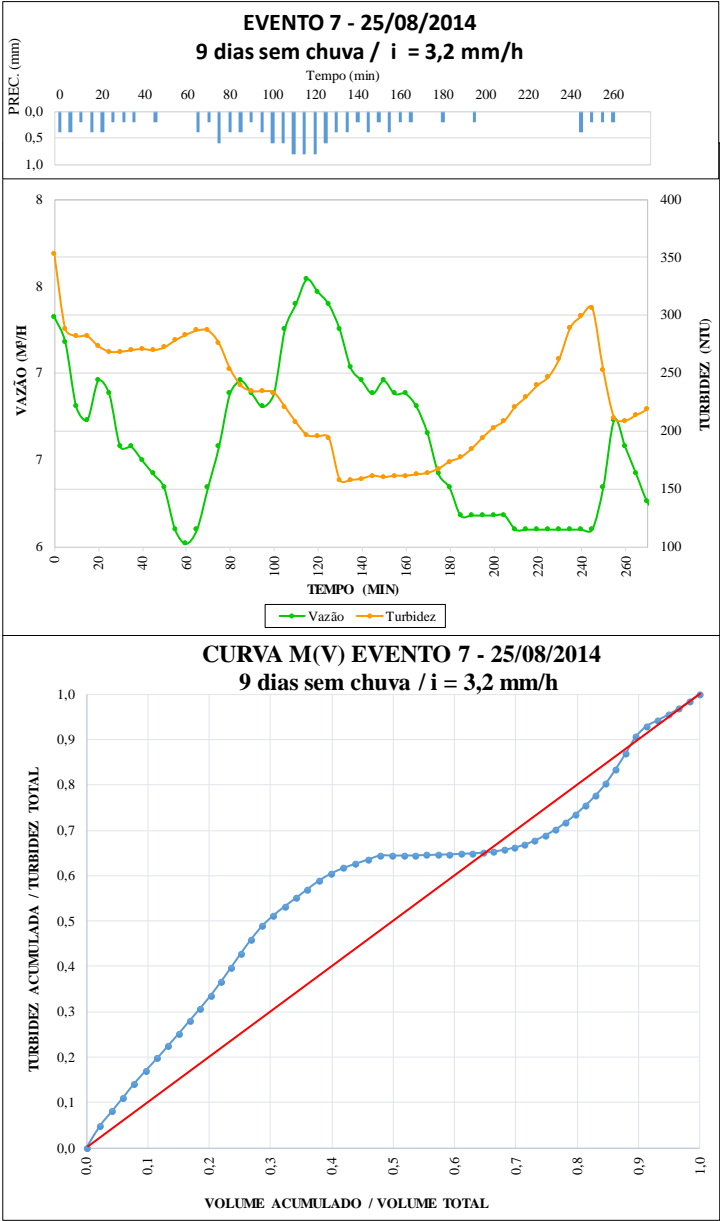


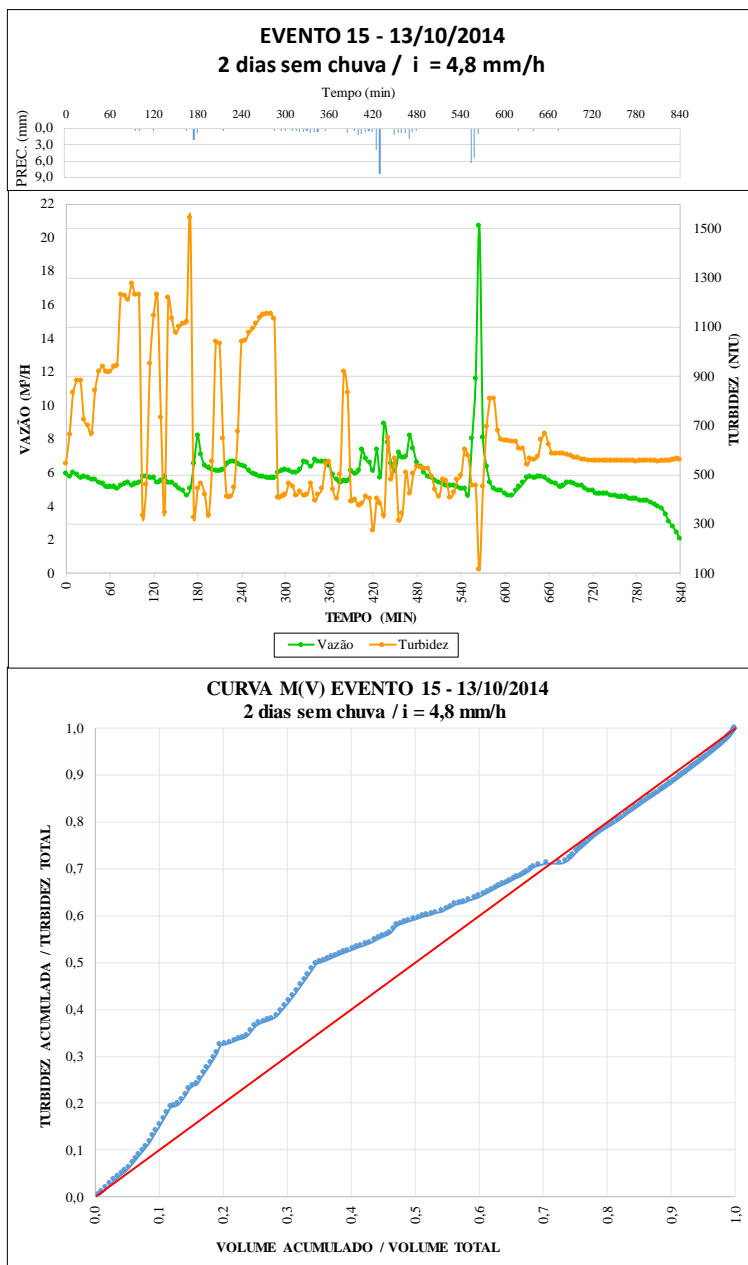
8.2 Moderada carga de lavagem

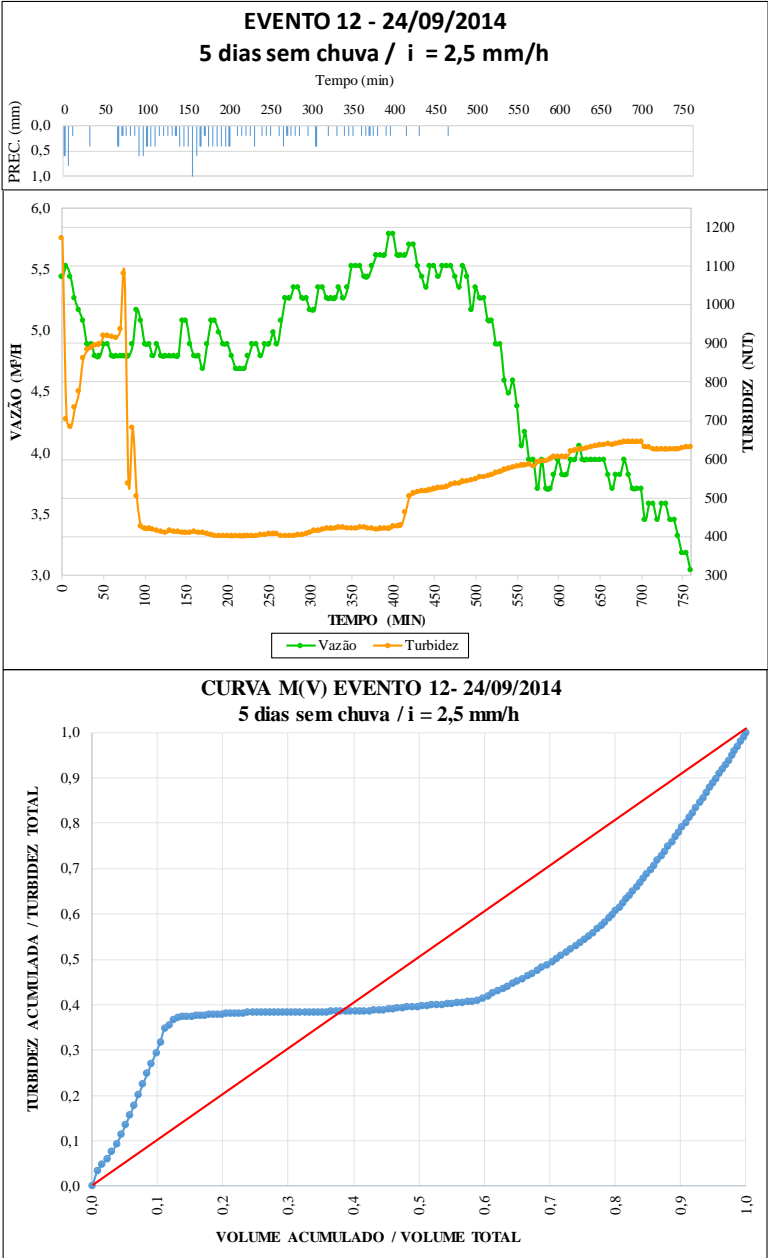


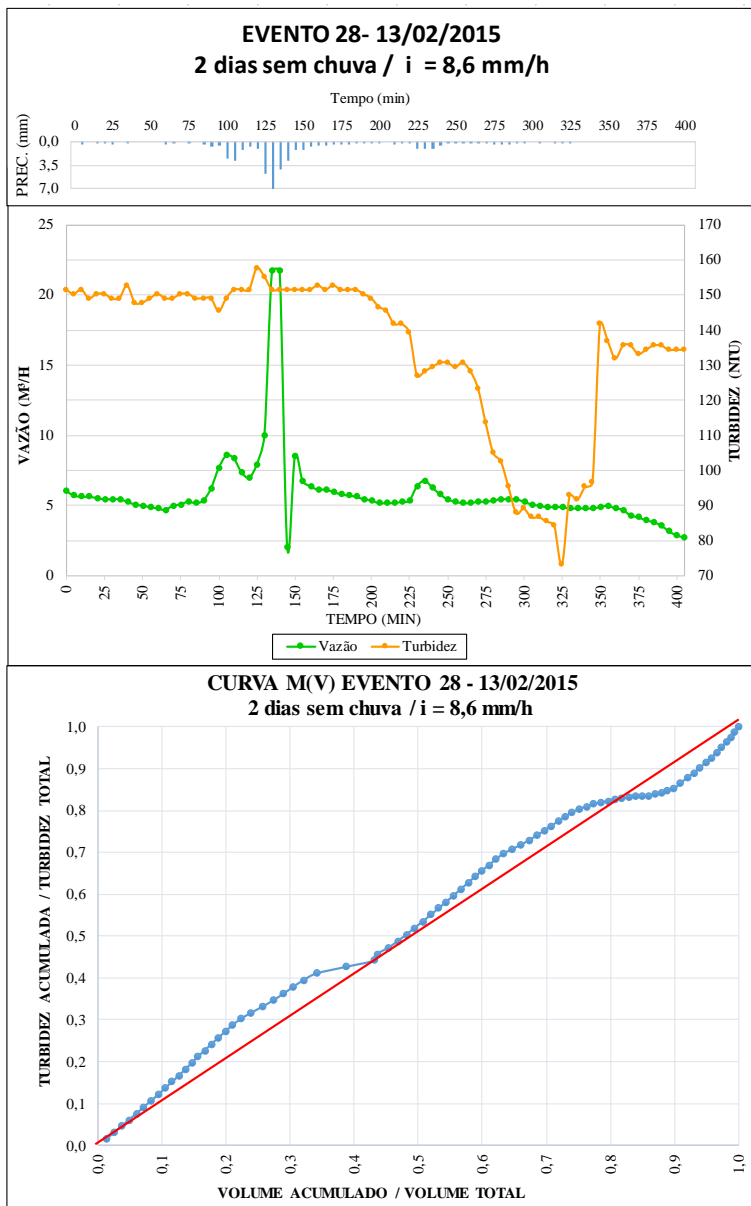




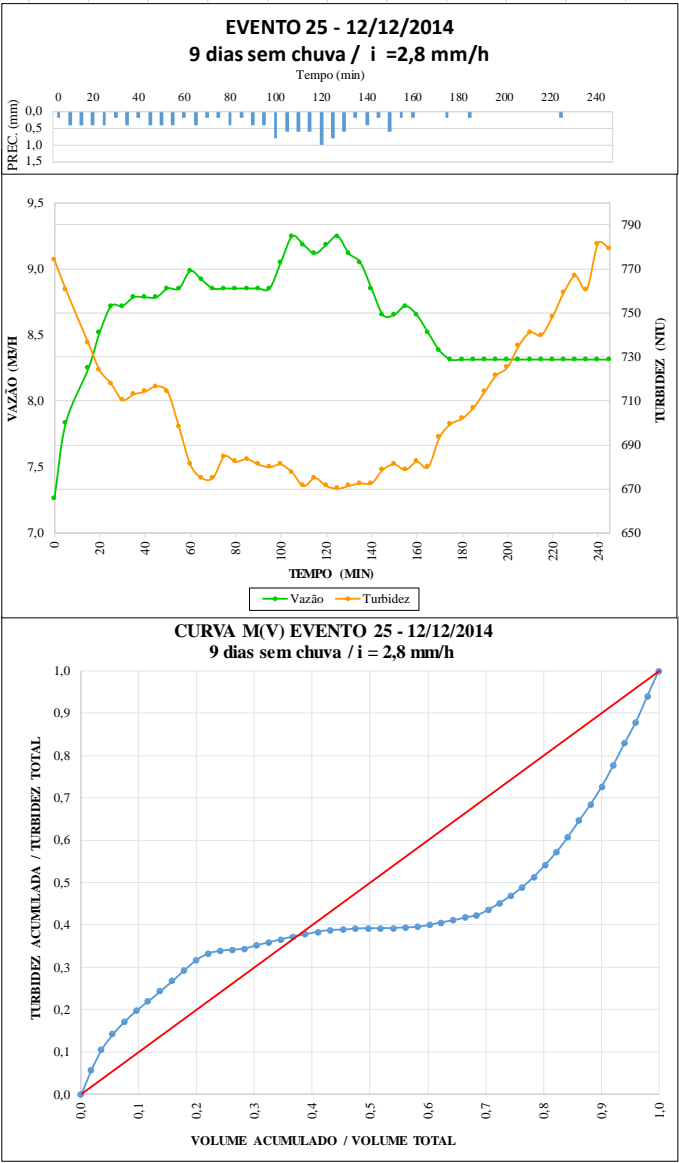


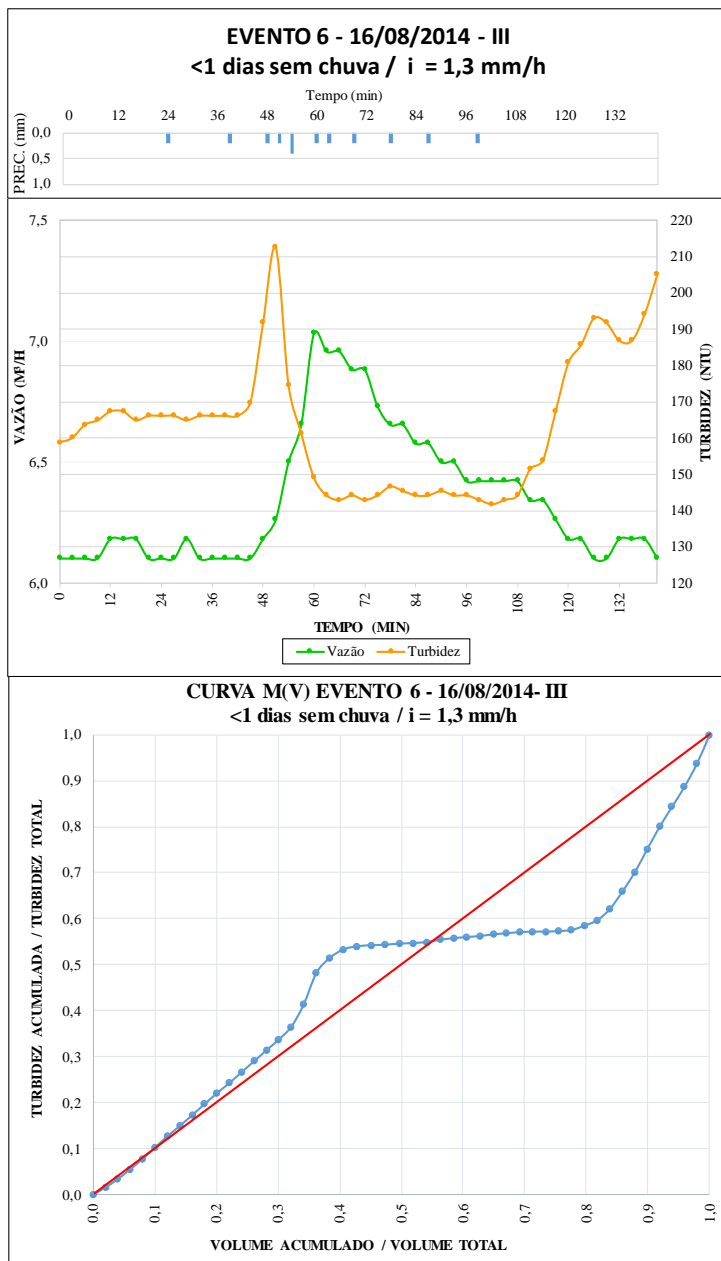


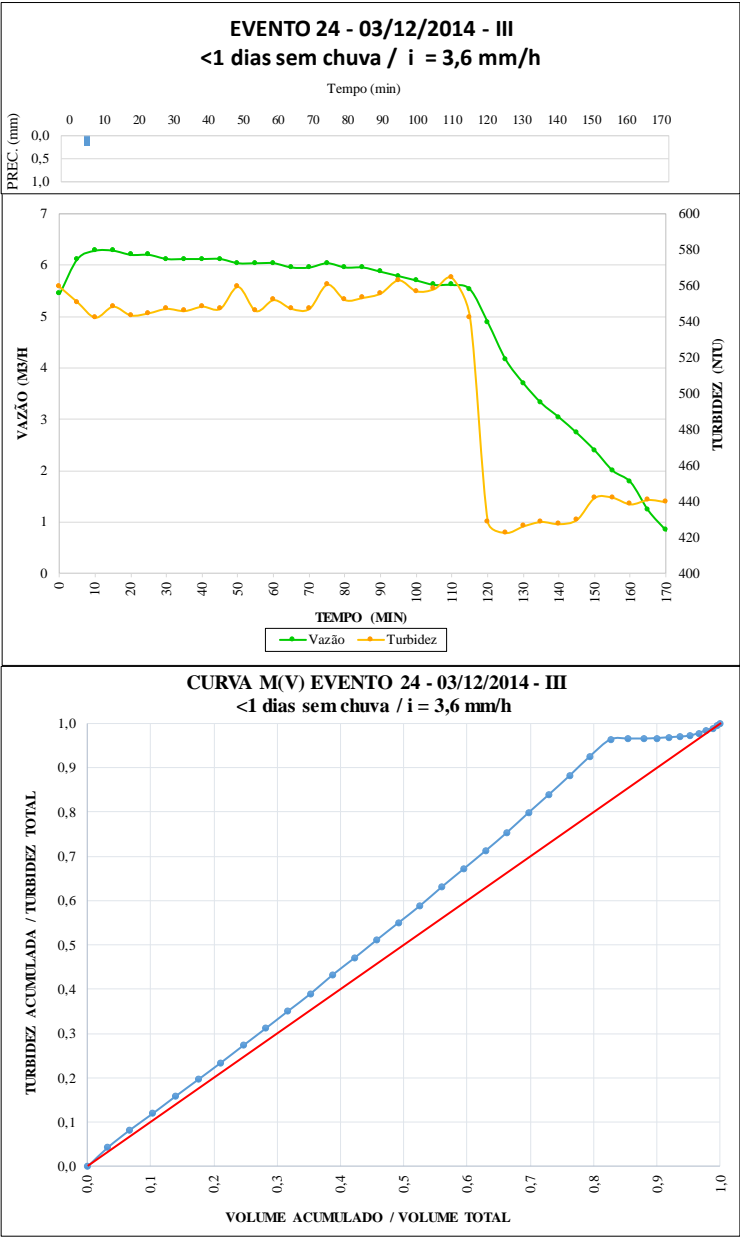


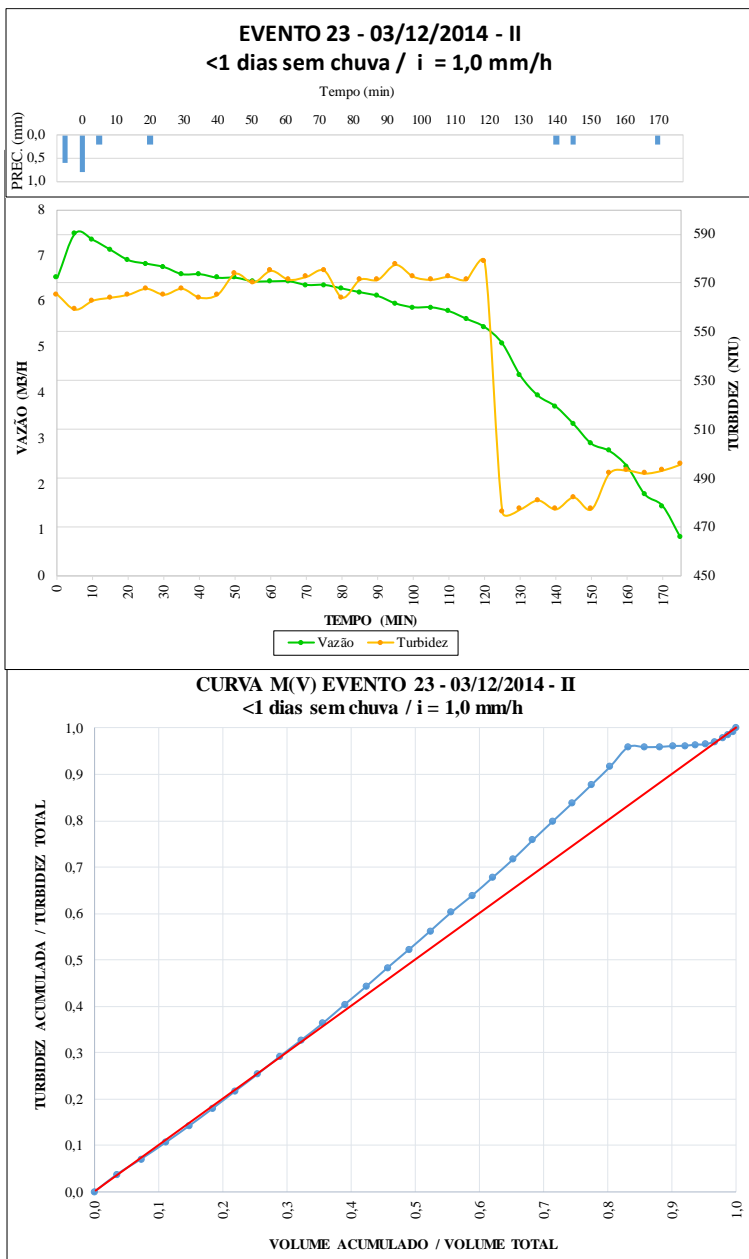


8.3 Fraca carga de lavagem

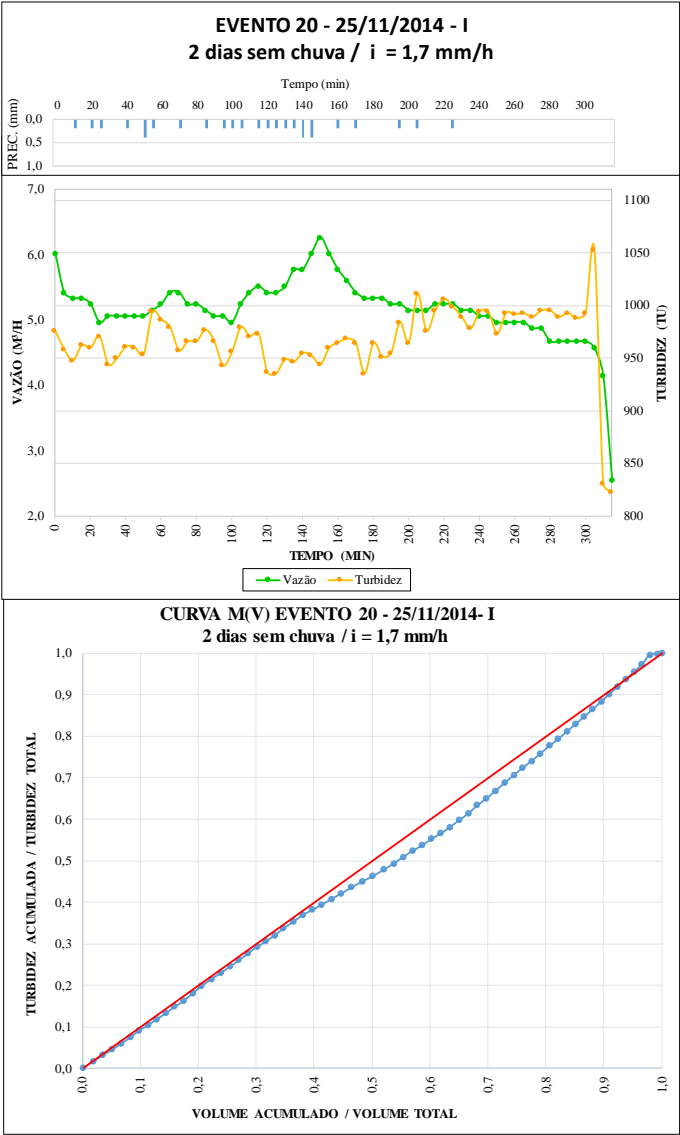


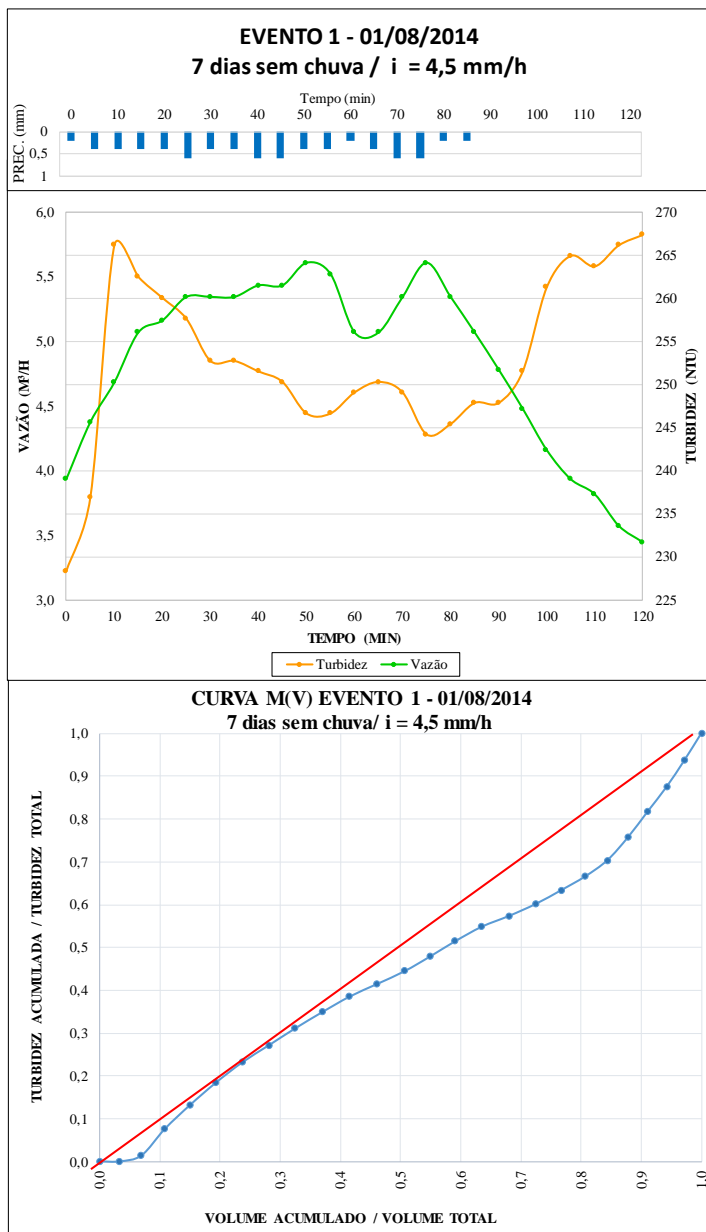


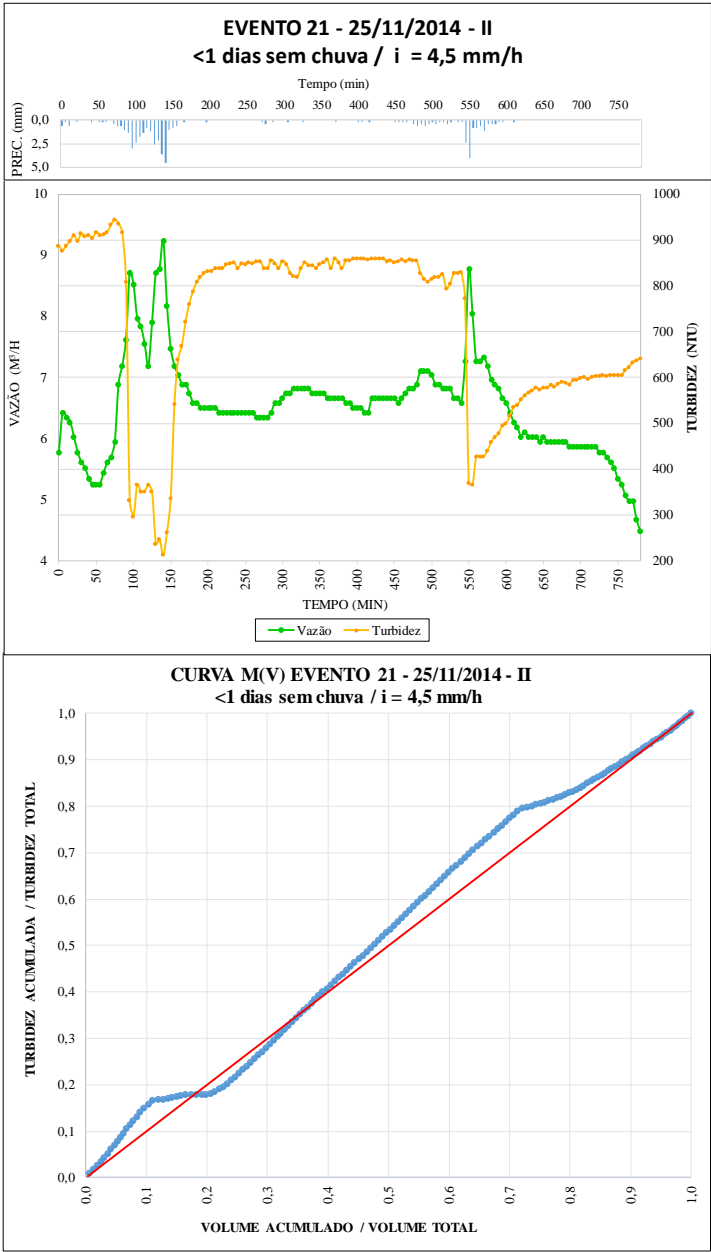


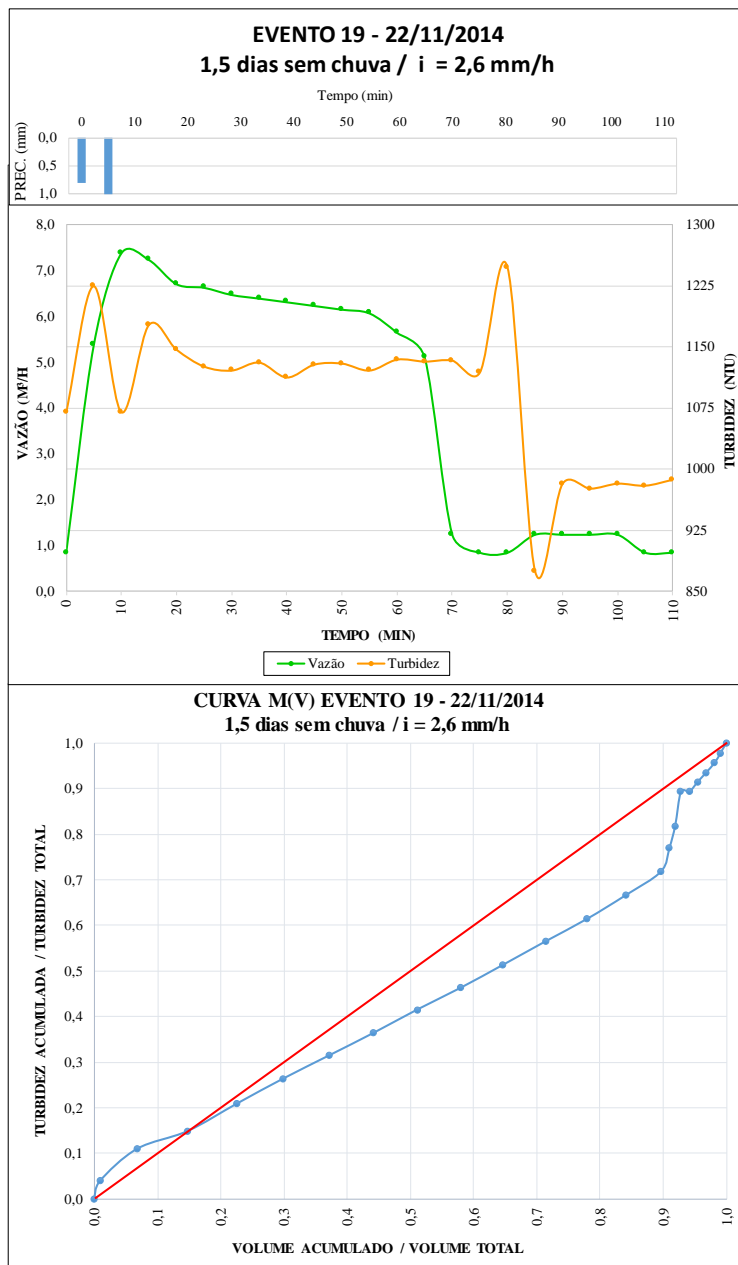


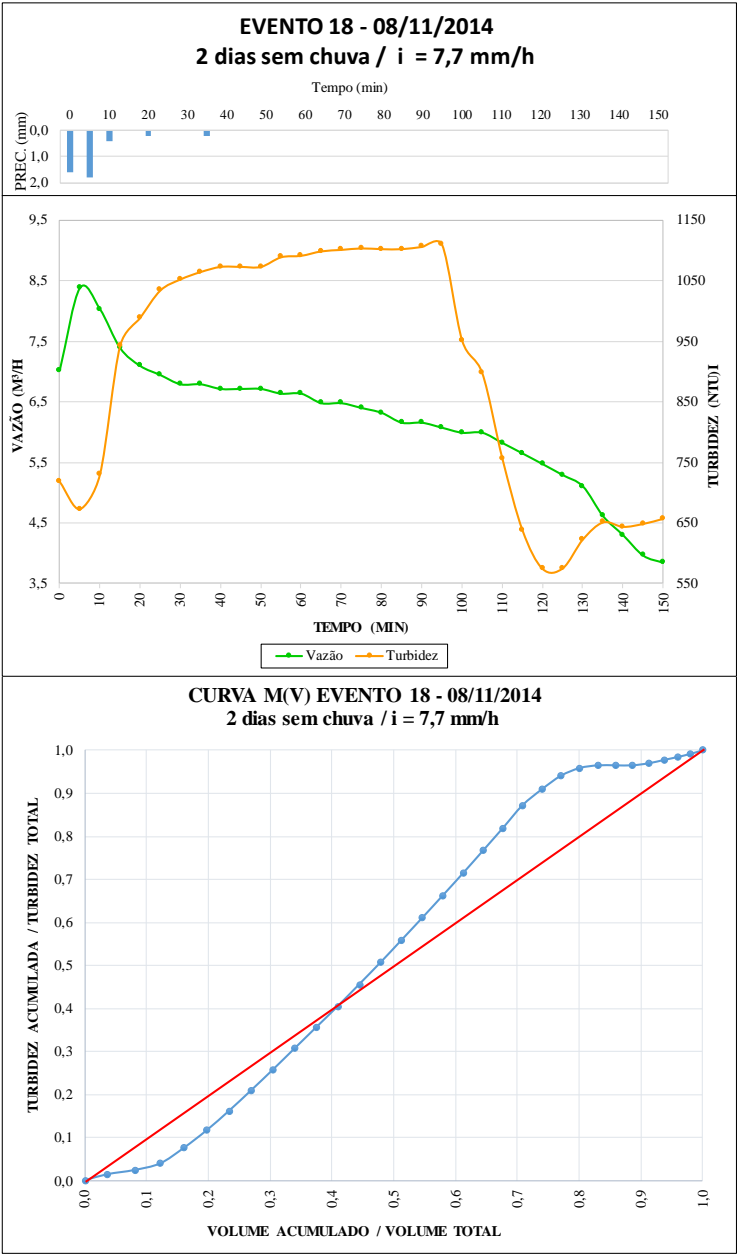
8.4 Sem carga de lavagem

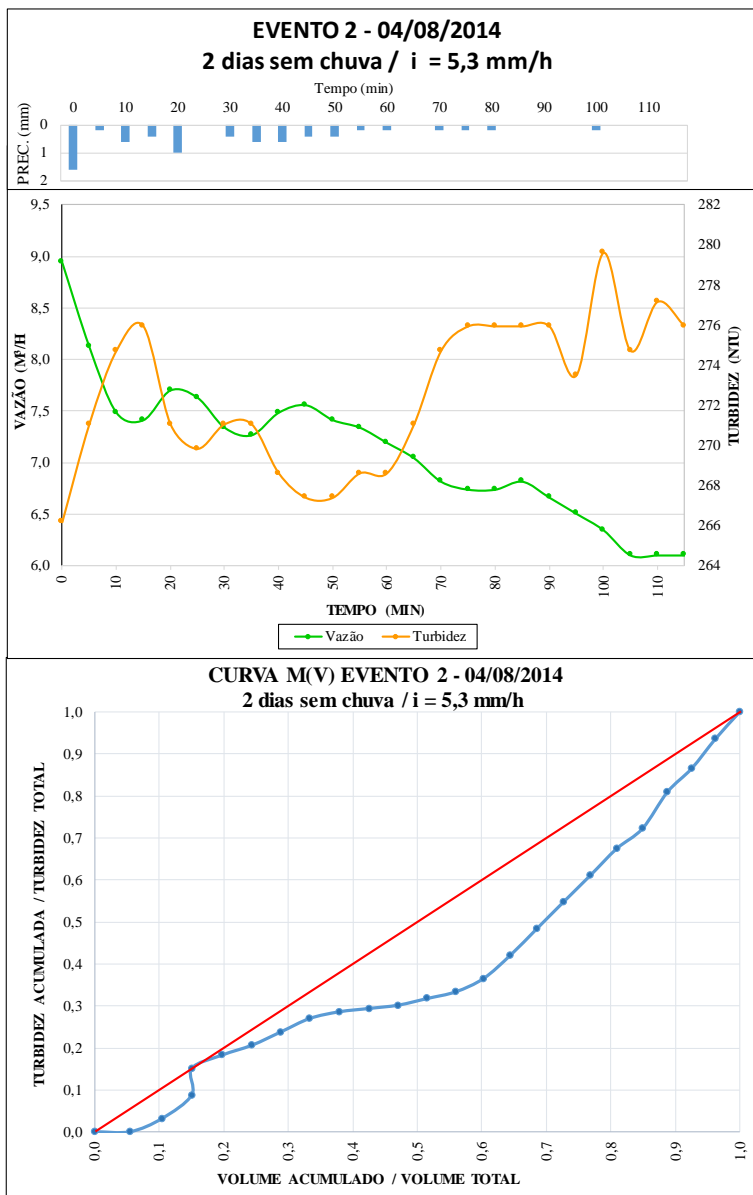












8.5 Sem carga de lavagem e moderado atraso na descarga da turbidez

